



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISA NUMERIK PENGARUH LAJU ALIR UDARA
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN
PADA *MINI BLAST FURNACE***

**AFRIYANTO
NRP 2712 100 061**

**Dosen Pembimbing
Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**NUMERICAL ANALYSIS OF BLAST RATE EFFECT ON
THE TEMPERATUR AND PRESSURE DISTRIBUTION IN
MINI BLAST FURNACE**

**AFRIYANTO
NRP 2712 100 061**

**Advisor
Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.**

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL
ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISA NUMERIK PENGARUH LAJU ALIR UDARA TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN PADA *MINI BLAST FURNACE*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Ekstraksi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
AFRIYANTO
NRP. 2712 100 061

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT. (Pembimbing I)

Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MT. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISA NUMERIK PENGARUH LAJU ALIR UDARA TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN PADA *MINI BLAST FURNACE*

Nama Mahasiswa : Afriyanto
NRP : 2712 100 061
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

Abstrak

Mini blast furnace merupakan teknologi untuk mengolah bijih besi menjadi besi spon. Investasi yang tinggi dan minimnya kajian *mini blast furnace* menjadikan penguasaan teknologi *mini blast furnace* tidak dikuasai. Solusi untuk mengurai permasalahan ini adalah dengan melakukan kajian *mini blast furnace* secara numerik.. Dalam proses *mini blast furnace*, laju alir udara yang optimal akan dihasilkan produktifitas yang optimal. Pada penelitian ini menggunakan parameter operasi dan geometri *mini blast furnace* Anyang Steel dengan variasi laju alir udara sebesar 10,36 kg/s, 14,81 kg/s dan 19,25 kg/s. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin tinggi laju alir udara maka profil temperatur *mini blast furnace* akan semakin naik sehingga *burden velocity* dan produktifitas juga ikut naik. Produktifitas tertinggi diperoleh dari *blast rate* 19,25 kg/s dengan nilai sebesar 934 t/day. Selain itu, peningkatan laju alir udara juga akan menaikkan profil tekanan gas di *mini blast furnace* yang mengakibatkan *pressure drop* naik. Nilai *pressure drop* tertinggi sebesar 0,94 atm. Jumlah gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan laju alir udara.

Kata Kunci: *mini blast furnace*, laju alir udara, analisa numerik, produktifitas.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERICAL ANALYSIS OF BLAST RATE EFFECT ON THE TEMPERATURE AND PRESSURE DISTRIBUTION IN MINI BLAST FURNACE

Name : Afriyanto
NRP : 2712 100 061
Departement : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

Abstract

Mini blast furnace is technology to process the iron ore to be sponge iron. High invest and few research about Mini Blast Furnace make this technology not yet develop. The solution to analyze this problem is with Mini Blast Furnace based numerical analysis. In Mini Blast Furnace process, the air (Blast Rate) will blown through tuyere to burn the coke. The optimum blast rate injection will result optimum productivity. In this research is using operation and geometry parameter Mini Blast Furnace of Anyang Steel with vary value of Blast Rate 10,36 kg/s, 14,81 kg/s, and 19,25 kg/s. Based from the simulation, we conclude that if blast rate increase, the profile temperature of Mini Blast Furnace will increase too. Increases of profil temperature will increase burde velocity so it will increase the productivity. The highest productivity is blast rate with 19,25 kg/s with value 934 t/day. Beside that, increases of blast rate will increase the gas pressure profile in Mini Blst Furnace that causes increase of pressure drop. Highest value pressure drop is 0.94 atm with blast rate 19,25 kg/s. Amount of carbon monoxide and carbon dioxide will increases with the increases of blast rate.

Keyword: *mini blast furnace, blast rate, numerical analysis, productifity.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Besi dan Bijih Besi	5
2.2 <i>Blast Furnace</i>	7
2.2.1 <i>Raceway</i>	8
2.2.2 <i>Cohesive Zone</i> (Area Kohesif)	10
2.2.3 <i>Deadman</i>	11
2.3 Laju Alir Udara	12
2.4 Aliran Gas Reduktor dalam <i>Blast Furnace</i>	15
2.4.1 Distribusi Gas Pada Lapisan <i>Ore</i>	16
2.4.2 Kontrol Aliran Gas	17
2.5 Profil Temperatur <i>Blast Furnace</i>	19
2.6 Perubahan Tekanan (<i>Pressure Drop</i>) pada <i>Blast Furnace</i>	21
2.7 Reaksi Kimia Dan Transformasi Fase Dalam <i>Blast Furnace</i>	22
2.8 Pemodelan <i>Blast Furnace</i>	25
2.8.1 Aliran Fase Gas	25
2.8.2 Aliran Fase Solid.....	26
2.8.3 Aliran Fase Cair	26

2.9 Analisis Numerik Pada <i>Blast Furnace</i> Berdasarkan Teori Multi-Fluid	26
2.9.1 Persamaan Momentum	27
2.9.2 Persamaan Perpindahan Panas	30
2.9.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik	32
2.10 MBF <i>Anyang Steel</i>	34
2.11 Penelitian Sebelumnya	39
2.11.1 Analisa numerik performa <i>blast furnace</i> dengan material model baru menggunakan simulator multi-dimensional berdasarakan multi-fluidtheory	39
2.11.2 Model pemasukan udara pada <i>blast furnace</i>	39
2.11.3 Pengaruh pemasukan udara terhadap erosi refraktori dengan menggunakan water modelling	39
2.11.4 Pemodelan CFD <i>pulvurized coal injection</i> pada <i>blast furnace</i>	39
BAB III METODOLOGI.....	41
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	41
3.2 Prosedur Pemodelan	42
3.2.1 Persiapan Data.....	42
3.2.2 Perhitungan Mass Balance untuk MBF	42
3.2.3 Pembuatan Model MBF	42
3.2.4 Validasi dengan Data Trial MBF	43
3.3 Software dan Bahasa Pemrograman	43
3.3.1 <i>Compaq Visual Fortran</i>	43
3.3.2 <i>Understand</i>	43
3.3.3 <i>Tecplot 2015</i>	44
3.4 Geometri MBF	44
3.5 Komposisi <i>material</i> yang digunakan dalam program	46
3.5.1 Bijih Besi.....	46
3.5.2 Kokas.....	46
3.5.3 PCI (Batubara)	47
3.5.4 Udara Panas (<i>Hot Blast</i>)	47
3.6 Laju Material Masuk dalam MBF	48
3.7 Material Properties	48
3.7.1 Sifat Fase Gas.....	49

3.7.2 Sifat Fase Solid.....	51
3.7.3 Sifat Logam Cair	53
3.7.4 Sifat Slag cair	54
3.7.5 Sifat Powder	54
3.8 Persamaan Inputan pada Pemodelan	55
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	59
4.1 Validasi Pemodelan MBF	59
4.1.1 Validasi Program BF65 Model dengan Data Distribusi Temperatur Penelitian Sungging, H. Nogami, J.I. Yagi	59
4.1.2 Validasi dengan Data Operasional dari MBF <i>Anyang Steel</i>	62
4.2 Data Fenomena Fisik MBF dengan Variabel Laju Alir Udara	66
4.2.1 Analisa Distribusi Temperatur	66
4.2.2 Analisa Distribusi Tekanan	73
4.3 Analisa Distribusi Gas Karbon Monoksida dan Karbon Dioksida.....	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	89

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bijih besi primer (Anni,2016).....	5
Gambar 2.2 Bijih besi hidroksida (Anni,2016)	6
Gambar 2.3 Pasir besi (Anni,2016)	7
Gambar 2.4 Hembusan udara panas pada daerah <i>raceway</i> (Nogami, 2006).....	10
Gambar 2.5 Skematik <i>blast furnace</i> (Natsui, 2011)	11
Gambar 2.6 Diagram <i>net</i> untuk kupola (Patterson,1961)	14
Gambar 2.7 Hubungan <i>voidage</i> , diameter dan <i>pressure drop</i> (Geerdes, 2009).....	15
Gambar 2.8 Skema distribusi aliran gas melewati lapisan kokas (Geerdes, 2009).....	16
Gambar 2.9 Profil temperatur <i>blast furnace</i> (Kitaev, 1957).....	19
Gambar 2.10 Proses reaksi reduksi dan daerah temperatur reduksi (Geerdes, 2009).....	20
Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian pemodelan MBF dengan variasi laju alir udara	41
Gambar 3.2 Mesh geometri 2 dimensi MBF	45
Gambar 4.1 Perbandingan (a) hasil perhitungan dan (b) hasil pengukuran distribusi temperatur (Sungging,dkk, 2005).....	61
Gambar 4.2 Perbedaan grid setelah modifikasi program [m].....	64
Gambar 4.3 Perbandingan distribusi temperatur dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25	69
Gambar 4.4 Grafik peningkatan <i>raceway adiabatic flame</i> <i>temperature</i>	71
Gambar 4.5 Grafik peningkatan kecepatan <i>burden material</i> turun, peningkatan produktifitas dan peningkatan laju slag	72
Gambar 4.6 Perbandingan distribusi tekanan dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,361, (b) 14,819 dan (c) 19,252	74

Gambar 4.7 Grafik peningkatan <i>pressure drop</i> <i>mini blast furnace</i>	75
Gambar 4.8 Perbandingan distribusi fraksi CO dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25.	78
Gambar 4.9 Perbandingan distribusi fraksi CO ₂ dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25	79
Gambar 4.10 Grafik jumlah CO atau CO ₂ pada <i>top gas</i> dan penurunan efisiensi	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Reaksi pada proses peleburan bijih besi di <i>blast furnace</i>	23
Tabel 2.2 Reaksi transformasi fasa pada proses peleburan di <i>blast furnace</i>	25
Tabel 2.3 Data dimensi MBF 300 m ³ <i>Anyang Steel</i> (Pandey, 2001)	35
Tabel 2.4 Data operasi MBF <i>Anyang Steel</i> (Pandey, 2001)	36
Tabel 2.5 <i>Material balance</i> dari <i>Anyang Steel</i> MBF (Pandey, 2001)	37
Tabel 2.6 Data komposisi material yang digunakan pada berbagai <i>blast furnace</i> di cina (Pandey, 2001)	38
Tabel 3.1 Komposisi bijih besi (Pandey, 2001)	46
Tabel 3.2 Komposisi kokas yang digunakan MBF (Pandey, 2001)	47
Tabel 3.3 Komposisi PCI (batubara) (Sungging, 2005)	47
Tabel 3.4 Komposisi <i>hot blast</i> (Pandey, 2001)	48
Tabel 3.5 Laju material masuk (Pandey, 2001)	48
Tabel 3.6 Fase dan spesies kimia (Sungging, 2005)	49
Tabel 3.7 Koefisien untuk persamaan <i>heat capacity</i> fase gas (Sungging, 2005)	51
Tabel 3.8 Panas pembentukan (kcal/kmol) (Sungging, 2005)	51
Tabel 3.9 Koefisien untuk persamaan <i>heat capacity</i> fase solid dan powder (Castro, 2000)	52
Tabel 3.10 Panas pembentukan (kcal/kmol) (Castro, 2000)	53
Tabel 3.11 Parameter powder pada pemodelan (Nogami, 2006)	55
Tabel 3.12 Berat molekuler (kg/kmol) (Nogami, 2006)	55
Tabel 3.13 Persamaan momentum tiap fase (Castro, 2000)	56
Tabel 3.14 Persamaan energi setiap fase (Castro, 2000)	56
Tabel 3.15 Persamaan fraksi massa dari setiap spesies kimia (Castro, 2000)	57
Tabel 3.16 Berat molekuler (kg/kmol) (Castro, 2000)	58
Tabel 4.1 Parameter operasi <i>blast furnace</i> 4550 m ³ (Sungging, 2005)	60

Tabel 4.2 Parameter operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001) 65

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan dan pengukuran MBF
Anyang Steel 66

Tabel 4.4 Parameter operasi yang digunakan dalam pemodelan. 68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi pengolahan material saat ini sangat diperlukan terutama untuk menunjang pengolahan material di dalam negeri. Teknologi pengolahan material yang banyak digunakan yaitu *blast furnace*. Berbagai penelitian telah dilakukan terutama untuk meningkatkan produktifitas dan efisiensi *blast furnace*. Sebagai institusi pendidikan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember juga melakukan penelitian dengan mengembangkan *mini blast furnace* sebagai bentuk dukungan terhadap UU Minerba No 4 tahun 2009.

Mini blast furnace (MBF) merupakan teknologi yang prinsip kerjanya sama dengan *blast furnace*, yang membedakan MBF dengan *blast furnace* yaitu ukuran MBF maksimal 500 m³ yang artinya ukuran MBF lebih kecil dibandingkan *blast furnace*. MBF ini banyak dikembangkan di berbagai negara berkembang karena biaya investasi awal yang tidak terlalu tinggi. Salah satu MBF yang dikembangkan yaitu MBF Anyang milik Tiongkok dengan *inner volume* 300 m³.

Penelitian MBF saat ini berbasis terhadap eksperimen, dimana biaya yang diperlukan juga tidak sedikit. Selain itu penelitian berbasis eksperimen ini menggunakan metode *trial error*. Maka diperlukanlah sebuah model penelitian berbasis simulasi pemodelan untuk pengembangan MBF dengan tujuan mempersempit parameter pemilihan variabel *trial error* dan tentunya untuk meningkatkan efektifitas penelitian.

Dalam proses di MBF, sejumlah udara akan ditiupkan melalui tuyer untuk membakar kokas. Hasil pembakaran dari kokas ini berupa gas reduktor dan juga panas. Gas reduktor ini naik keatas untuk mereduksi *burden material* yang turun kebawah sehingga sesuai dengan prinsip *counter current reactor*. Injeksi laju alir udara yang optimal akan menghasilkan proses yang



BAB I PENDAHULUAN

optimal pula di dalam MBF sehingga produktifitas akan meningkat.

Dalam penelitian ini akan digunakan simulator *blast furnace* yang dikembangkan oleh *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* di Tohoku University, dimana simulator *blast furnace* ini telah dapat memprediksi proses yang terjadi di dalam *blast furnace* dengan baik berdasarkan konsep *heat*, *mass* dan *momentum transfer*, *termodinamika*, dan fenomena transport (Nogami, 2006). Program tersebut dikhususkan untuk mengolah bijih besi menjadi *pig iron*. Sehingga program ini layak digunakan dalam penelitian ini karena MBF Ayang juga beroperasi untuk mengolah bijih besi menjadi *pig iron*. Program tersebut memiliki kode yaitu BF65 Model yang merupakan hasil komputerisasi persamaan konservasi massa, energi, momentum dan panas yang disusun dalam bahasa pemrograman fortran. Program ini terdiri atas 122 *subroutine* dengan *main.f* sebagai file utama program. Program ini terdiri atas 3 bagian utama dalam konsep penyelesaiannya yaitu inisialisasi, kalkulasi dan *output*.

Dengan mengaplikasikan program simulasi *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* pada MBF Anyang dan memvariasikan jumlah laju alir udara diharapkan akan mampu memberikan informasi empirik mengenai pengaruh laju alir udara terhadap distribusi temperatur, distribusi tekanan dan juga distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida MBF.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini yaitu

1. Bagaimana pengaruh laju alir udara terhadap distribusi temperatur MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan?
2. Bagaimana pengaruh laju alir udara terhadap distribusi tekanan MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan?



3. Bagaimana pengaruh laju alir udara terhadap distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah yaitu:

1. Material bahan baku dianggap homogen secara sifat, komposisi, dan ukuran.
2. Desain reaktor MBF yang digunakan dalam pemodelan dianggap sudah baik dari aspek struktur.
3. Pemodelan dilakukan dalam keadaan *steady state* 2 dimensi.
4. Distribusi rongga gas dalam MBF diasumsikan konstan.
5. Ukuran kokas dianggap homogen.
6. Yield Fe hasil ekstraksi dianggap 100 persen.
7. Ukuran raceway dianggap homogen.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan yaitu

1. Mengetahui pengaruh laju alir udara terhadap distribusi temperatur MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan.
2. Mengetahui pengaruh laju alir udara terhadap distribusi tekanan MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan.
3. Mengetahui pengaruh laju alir udara terhadap distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida MBF dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat untuk memberikan informasi empirik dan parameter proses yang optimal untuk mengolah *ore*/bijih besi nasional menjadi besi spon khususnya pada jumlah laju alir udara dengan menggunakan pemodelan MBF serta dapat digunakan untuk acuan kerja para operator di industri pengolahan besi dan baja.



BAB I PENDAHULUAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA



BAB II TINJAUAN PUSTAKA



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

batu tahan api (refraktori). Struktur *blast furnace* berbentuk silinder memanjang dengan bagian atas dan bagian bawah dibuat meruncing/konus. Pada puncak dari *blast furnace* terdapat *hopper* dan pembuangan gas setinggi 3 m. Sistem pemasukan material umpan termasuk kokas dan bijih besi/ore terdapat pada bagian atas *blast furnace* melalui *hopper* yang mengatur distribusi material umpan terdistribusi merata, selanjutnya material umpan akan mengalami pemanasan awal pada area *preheat* dan mengalami melting pada area *melting* serta mengalami superheat dan tereduksi pada area reduksi. Tahap akhir dari proses *blast furnace* adalah pengeluaran logam cair dan *slag* yang dikeluarkan melalui lubang yang terpisah untuk logam cair dan slag. Kedua lubang keluaraan ini terpisah dengan prinsip kerja memanfaatkan berat jenis dari logam cair dan *slag*. Pada bagian bawah *blast furnace* atau disebut *bosh* dilengkapi dengan beberapa lubang pembuka atau tuyser. Tuyser memiliki fungsi sebagai pensuplai udara yang akan membuat tiupan aliran udara panas. Pada bagian bawah dekat dengan dasar *bosh* terdapat *tapping hole* atau lubang yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya logam cair hasil proses dari *blast furnace*. Tuyser terletak diatas *tapping hole* dengan bentuk tuyser pada umumnya melingkar mengelilingi *blast furnace*. Struktur tuyser biasanya terdiri dari sabuk pipa silinder yang diletakkan pada bagian luar *blast furnace* dan diberikan pipa pengalir masuk ke bagian dalam *blast furnace* dengan pipa pengalir berdiameter lebih kecil dibanding dengan pipa sabuk. Desain dari tuyser ini memberikan andil pada tingkat keberhasilan proses dalam *blast furnace*. Pada bagian ini terdapat lubang untuk mengalirkan slag. Lubang ini biasanya terletak pada area dibawah tuyere dan diatas *tapping hole* (Rahmat, 2016).

Bagian dalam *blast furnace* terbagi atas tiga struktur fisik (Austin, 2006) yaitu:

2.2.1 Raceway

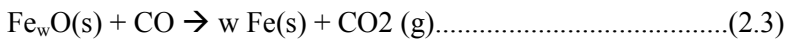
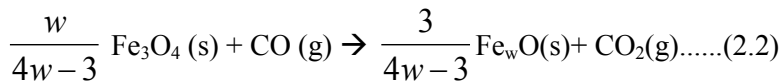
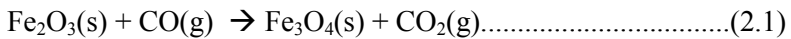
Raceway adalah area dimana banyak terdapat kekosongan atau *void* dikarenakan terdapat hembusan fluida / udara bertekanan dan berkecepatan tinggi dari tuyser. Karena hembusan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

udara ini maka energi panas atau termal terbentuk dan pada area ini temperatur tertinggi *blast furnace* berada pada area ini. Energi panas yang terbentuk akan memanaskan kokas dan terjadi reaksi sehingga terbentuk karbon monoksida dan karbon dioksida.

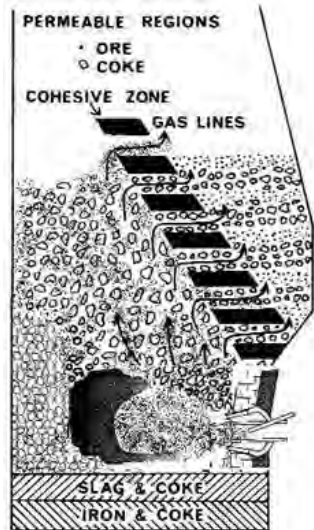
Karbon monoksida merupakan gas reduktan yang dapat mereduksi oksida besi secara tak langsung. Keboleh jadian reduksi oksida besi secara tak langsung terjadi dalam bentuk tiga tahapan reaksi kimia dalam persamaan 2.1 - 2.3 (Castro, 2005).



Panas dari reaksi di area *raceway* juga membentuk gas panas, dimana gas ini akan bergerak ke atas menjadi pemanas awal material umpan saat masuk pada bagian atas *blast furnace*. Skematik bentuk *raceway* pada *blast furnace* terdapat pada ilustrasi Gambar 2.4.



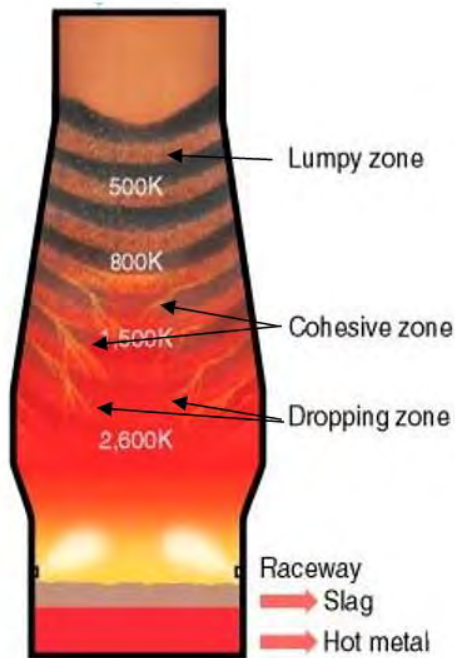
BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.4 Hembusan udara panas pada daerah *raceway*
(Nogami, 2006)

2.2.2 Cohesive Zone (Area Kohesif)

Pada area kohesif ini material umpan (ore, sinter atau pellet) meleleh dan mencair. Proses pencairan material umpan ini menjadi batas kondisi untuk menentukan laju pencairan dan laju produksi dari proses di *blast furnace*. Pada saat terjadi fenomena pencairan dari material padat ke cair material akan mengalami penurunan sifat permabilitasnya (Sungging, 2005). Faktor ini yang harus diperhatikan sehingga suplai udara yang dihembuskan melalui tuyser tetap menjaga kecepatan aliran dalam *blast furnace* stabil. Pada area ini material solid berada pada temperatur 1200 – 1400 °C. Area kohesif dapat mempresentasikan beberapa perbedaan bentuk bergantung dengan kondisi proses.



Gambar 2.5 Skematik *blast furnace* (Natsui, 2011)

2.2.3 *Deadman*

Pada area ini terdapat pergerakan yang sangat lambat dari fase solid atau dapat diartikan area statik. *Deadman* berbentuk konikal terletak pada bagian tengah *bosh*, pada area *deadman* kokas diam dalam jangka waktu yang lama-harian (Castro, 2006). Pada umumnya pada daerah *deadman* ukuran kokas lebih kecil dibanding dengan rata rata ukuran kokas pada *blast furnace* yang dapat mengakibatkan reaksi dilusi dari karbon, reduksi secara langsung oksida besi dan transfer silika. Reaksi reduksi langsung pada proses pengolahan bijih besi melibatkan karbon dari kokas dan merupakan reduktan yang kuat. Reaksi reduksi ini merupakan reaksi endotermik yang sangat kuat sehingga membutuhkan

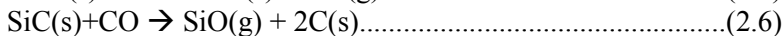
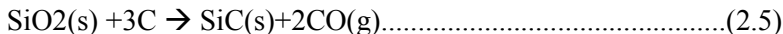


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

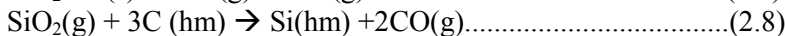
temperatur yang tinggi. Reaksi kimia reduksi oksida besi secara langsung oleh karbon dapat dilihat pada persamaan 2.4



Selain reaksi reduksi secara langsung oksida besi oleh reduktan karbon, pada area ini juga terjadi transfer silika. Transfer silika juga merupakan proses yang sangat penting setelah proses reduksi oksida besi. Pada transfer silika, silika akan menjadi silika dalam bentuk gas dan abu. Secara partial silika akan tereduksi menjadi SiC atau Gas SiO. Proses pembentukan SiC dan gas SiO sesuai dengan persamaan 2.5 dan 2.6



Gas SiO akan kembali teroksidasi saat pendinginan atau tereduksi saat mengalami kontak dengan logam cair (Sungging, 2005). Reaksi terjadi saat pembentukan logam dan slag pada persamaan 2.7 dan 2.8



2.3 Laju Alir Udara

Semakin tinggi laju alir udara, maka semakin tinggi pula temperatur tapping dari logam cair hingga mencapai suatu titik tertentu dan kemudian turun dengan meningkatnya laju alir udara.

Sebuah kupola, yang menjadi dasar prinsip reaktor MBF, bekerja paling efisien dan ekonomis ketika dioperasikan pada laju alir udara yang yang tepat. Dalam praktek, laju alir udara yang optimal bervariasi terhadap tingkat perbandingan logam:kokas dan sifat dasar material yang dilelehkan. Akan tetapi, telah ditemukan bahwa, baik secara eksperimen dan praktek, laju alir udara yang optimal untuk peleburan besi kira-



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

kira ialah 115 m³/min per meter kuadrat dari luas cross sectional kupola pada daerah tuyer (Patterson, 1961).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Patterson (1961), laju alir udara yang digunakan erat hubungannya dengan kecepatan pelelehan pada MBF. Kecepatan pelelehan ini bergantung pada ratio kokas terhadap metal dan seberapa cepat kokas terbakar. Rasio pembakaran kokas ini ditentukan oleh laju alir udara. Hubungan antara laju alir udara, jumlah kokas, dan kecepatan pelelehan (*melting rate*) didapatkan pada rumus di bawah ini :

Jika:

Q = Laju alir udara, m³/min pada STP (0 °C, 101,3 kPa)

M = Jumlah karbon yang terbakar, kg/min

L = Jumlah udara yang digunakan, m³ (pada STP) per kg karbon yang terbakar

C = Jumlah karbon yang terbakar, kg per 100 kg besi

S = *Melting rate*

$$M = \frac{S \times 1000}{60} \times \frac{C}{100} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q = \frac{L \times S \times C}{6} \dots\dots\dots (2.10)$$

Ketika pengoperasian kupola, tidak hanya kecepatan leleh logam saja yang dibutuhkan, akan tetapi juga pada temperatur berapa. Gambar 2.6 menunjukkan korelasi antara pemasukan kokas, laju alir udara, kecepatan pelelehan dan temperatur logam. Gambar 2.6 disebut sebagai diagram „net“. Diagram net menunjukkan bahwa :

1. Pada rasio kokas : logam tertentu (atau lebih tepatnya, rasio karbon yang dibakar dengan besi), peningkatan laju alir udara akan menyebabkan peningkatan baik kecepatan pelelehan dan temperatur logam hingga mencapai nilai optimal tertentu. Kemudian, peningkatan laju alir udara akan menyebabkan temperatur logam turun.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

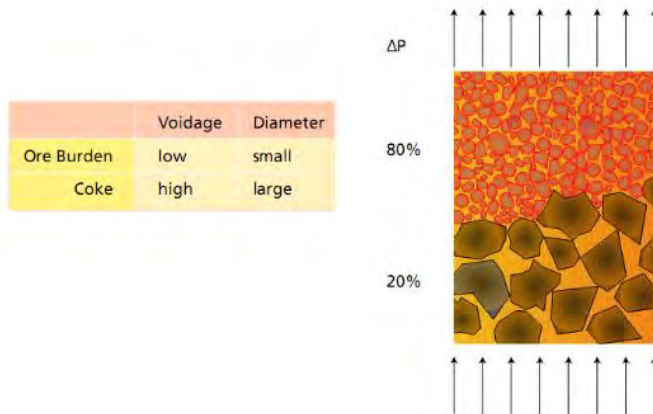


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Penambahan laju alir udara juga diketahui dapat meningkatkan rasio produksi dari blast furnace. Akan tetapi peningkatan laju alir udara ini tidak dapat dilakukan secara tidak terbatas, sebab dengan peningkatan yang sangat tinggi akan menyebabkan kondisi yang tidak diinginkan di dalam blast furnace, contohnya adalah penurunan tekanan yang sangat ekstrim di dalam blast furnace (Yasuo, 1982).

2.4 Aliran Gas Reduktor dalam *Blast Furnace*

Terdapat perbedaan antara lapisan bijih besi dan lapisan kokas. Perbedaan ini terjadi akibat adanya perbedaan ukuran diameter bijih besi dan kokas. Pada Gambar 2.7 terlihat bahwa lapisan bijih besi memiliki hambatan terhadap aliran gas yang lebih tinggi dibandingkan dengan hambatan pada lapisan kokas. Profil hambatan gas atau biasa disebut dengan *pressure drop* menunjukkan bagaimana gas mengalir di dalam *blast furnace* (Geerdes, 2009).



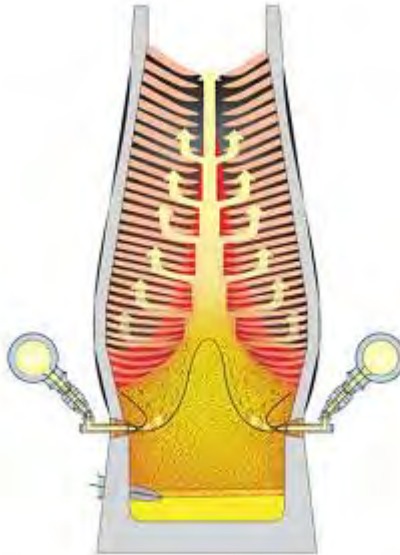
Gambar 2.7 Hubungan *voidage*, diameter dan *pressure drop* (Geerdes, 2009)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.4.1 Distribusi Gas Pada Lapisan Ore

Gas yang disemburkan dari tuyer didistribusikan melalui lapisan kokas kemudian melewati daerah kohesif selanjutnya melewati daerah kokas granular dengan lapisan bijih besi di atasnya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Skema distribusi aliran gas melewati lapisan kokas (Geerdes, 2009)

Pada daerah lapisan bijih besi diaproksimasikan sekitar 80% terjadi hambatan terhadap aliran gas reduktor. Proses reduksi mulai terjadi di daerah lapisan bijih besi dan kokas tersebut. Faktor yang paling penting untuk menentukan permeabilitas untuk aliran gas adalah voidage antara partikel. *Voidage* yang ditimbulkan antara partikel sangat bergantung pada rasio partikel kasar dengan partikel kecil. Semakin lebar distribusi ukuran, semakin rendah *voidage* tersebut. Selain itu, semakin halus material, semakin rendah permeabilitas. Dalam operasi praktis



permeabilitas bahan beban bijih ditentukan oleh jumlah partikel halus (persentase dibawah 5 mm) (Geerdes, 2009).

2.4.2 Kontrol Aliran Gas

Aliran gas optimal dalam tungku modern yang dioperasikan dengan produktifitas tinggi dan kecepatan input kokas yang rendah memiliki daerah zona kohesif berbentuk V terbalik. Tetapi, gas reduktor yang melalui pusat furnace (daerah pusat dimana tidak terdapat bijih besi) tidak dimanfaatkan dengan optimal. Kehilangan gas "tidak terpakai" ini harus diminimalkan. Jika aliran gas sentral terlalu tinggi, aliran gas di sepanjang dinding terlalu kecil untuk pemanasan, reduksi dan peleburan bijih besi dan akibatnya bagian bawah zona kohesif semakin mendekati tuyser. Dalam kondisi ini kecepatan pemakaian reduktor akan meningkat dan kemungkinan besar terjadi kerusakan tuyser. Sangat penting aliran gas pusat mendistribusikan aliran gas sendiri melalui celah kokas ke lapisan bijih besi. Oleh karena itu, permeabilitas bagian kokas sentral tidak boleh terlalu tinggi, yang berarti bahwa diameter kolom kokas pusat tidak harus terlalu lebar. Di lain sisi, jika aliran gas sentral tersebut (sebagian) ditahan, bagian gas yang relatif besar lewat sepanjang dinding *furnace* dan didinginkan rendah dalam tungku. Reaksi reduksi melambat. Dalam situasi ini aliran gas sentral kecil dan terjadi kerugian panas yang tinggi. Pengalaman menunjukkan bahwa aliran gas di dinding *furnace* dan aliran gas sentral *furnace* sangat berkorelasi. Pengontrolan aliran gas didasarkan pada keseimbangan antara aliran gas pusat dan dinding dengan optimal.

Kesulitan dengan kontrol aliran gas adalah aliran gas dipengaruhi oleh banyak perubahan dalam komponen material, parameter proses dan instalasi spesifik. Variasi dalam persentase partikel halus pada dinding (tidak semua) dan sifat kerusakan temperatur rendah dari material yang sangat penting (Geerdes, 2009).



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Aliran gas harus benar-benar dipantau untuk mengontrolnya. Parameter yang paling penting untuk mendefinisikan aliran gas adalah:

1. Penurunan material (*stok rods, pressure taps*) dan perbedaan tekanan dari material.
2. Kehilangan panas atau perubahan temperatur di dinding *furnace*.
3. Komposisi gas pada *stockline* dan profil temperatur.

Pengontrolan aliran gas dan pengoptimalan distribusi beban diketahui secara *trial and error*, dan telah dikembangkan untuk setiap jenis *furnace* yang berbeda secara individual. Beberapa komentar umum dapat dibuat:

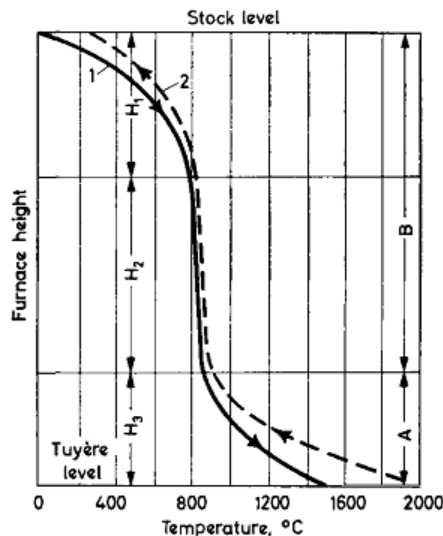
1. Aliran gas terutama dikendalikan dengan rasio diameter kokas dengan bijih besi.
2. Pusat *furnace* harus permeabel dan tidak ada atau minimalisir beban bijih (ukuran besar) dipusat *furnace*
3. Persentase kokas di dinding *furnace* tidak boleh terlalu rendah. Perhatikan bahwa tebal vertikal 70 cm bijih besi di daerah *throat* mengkonsumsi sekitar 25 cm tebal vertikal kokas untuk reduksi langsung. Sebuah kolom vertikal terus menerus dari material bijih besi harus dicegah. Celah dengan kokas harus dipertahankan antara semua lapisan bijih.
4. Konsentrasi partikel halus di dekat dinding harus dicegah.
5. Aliran gas sentral diatur oleh jumlah beban bijih mencapai pusat. Jumlah bijih mencapai pusat sangat bergantung pada ketebalan lapisan bijih dan jumlah benjolan kokas kasar. Untuk mencapai gas stabil aliran gas sentral harus disimpan sekonsisten mungkin dan akibatnya, ketika perubahan bijih untuk rasio kokas yang diperlukan, lapisan bijih harus dijaga konstan. Hal ini sangat penting ketika mengubah tingkat injeksi batubara karena hal ini akan mengakibatkan perubahan besar dalam ketebalan lapisan relatif bijih dan kokas yang dibuat.
6. Ketebalan lapisan kokas di *throat* biasanya di kisaran 40 sampai 60 mm. Dalam contoh kita di bagian 2.3 itu adalah 46



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

cm. Diameter perut adalah 1,4-1,5 kali lebih besar dari diameter *throat*. Oleh karena itu, permukaan lebih dari ganda selama keturunan beban dan ketebalan lapisan dikurangi menjadi kurang dari setengah ketebalan lapisan pada *throat*. Aturan jepang praktis menunjukkan bahwa ketebalan lapisan pada perut tidak boleh kurang dari 18 cm. Para penulis telah, bagaimanapun, berhasil bekerja dengan ketebalan lapisan kokas di perut 14 cm.

2.5 Profil Temperatur *Blast Furnace*



Gambar 2.9 Profil temperatur *blast furnace* (Kitaev, 1957)

Skema pertukaran panas menurut B.I Kitaev (Kitaev, 1957): A-*direct reduction*; B-*indirect reduction*; H1-*upper stage of heat exchange*; H3 – *blower stage of heat exchange*; H2 – *height not employed in heat exchange*; 1 – *burden temperatur*; 2 – *gas temperatur*.

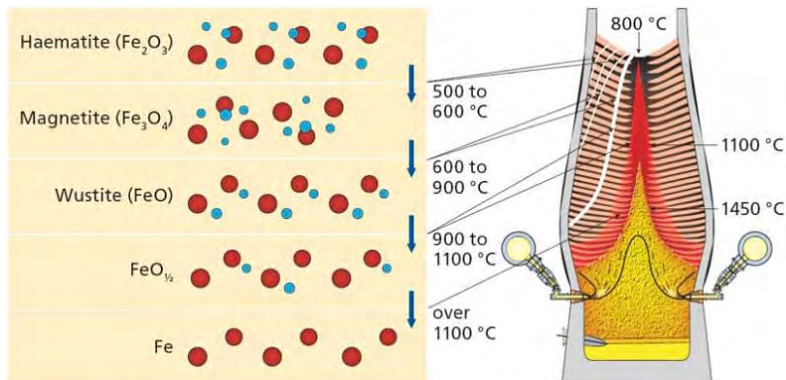
Dari Gambar 2.5 diketahui:



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1. Perpindahan dari gas *blast furnace* diselesaikan dengan 2 langkah, dipisahkan dengan zona reserve dengan variasi ketinggian
2. Temperatur operasi pada setiap tahap terjadi independen, kecuali temperatur pada tahap atas tergantung pada temperatur gas ketika melewati bagian bawah
3. Perpindahan panas pada *blast furnace* secara lengkap dilihat pada *reserve zone*

Profil temperatur dan reaksi kimia di *blast furnace* berkaitan erat. Pada Gambar 2.9 proses reduksi dari oksida menjadi wustit terjadi pada rentang temperatur 900-1100°C, wustit tersebut dapat tereduksi secara tidak langsung tanpa melalui reaksi boudouard. Daerah reaksi kimia ini terjadi pada 50 sampai 60% dari tinggi *furnace* dan mempunyai temperatur relatif konstan. Daerah ini dinamakan dengan daerah penyerapan temperatur (*High Thermal Reserve Zone* / HTRZ) (Geerdes, 2009).



Gambar 2.10 Proses reaksi reduksi dan daerah temperatur reduksi (Geerdes, 2009)



2.6 Perubahan Tekanan (*Pressure Drop*) pada *Blast Furnace*

Konsep dasar aliran gas melewati lapisan material adalah hambatan terhadap aliran (penurunan tekanan melewati ketinggian susunan *blast furnace*. Tujuan utama blast furnace untuk mendapatkan proses dengan permeabilitas gas yang sama dan tanpa hambatan besar sehingga *pressure drop* dihasilkan sekecil mungkin.

Jika laju aliran gas kecil (aliran laminar), pada awalnya terjadi *pressure drop* yang relatif kecil. Pada daerah laminar ini, kehilangan tekanan berbanding lurus dengan kecepatan dan disebabkan kehilangan energi kekentalan dari gas. Dengan meningkatnya kecepatan dan memasuki wilayah turbulensi, kehilangan tekanan meningkat. Kehilangan tekanan ini berhubungan dengan kehilangan energi kinetik. Jika pada pipa kosong diisi dengan partikel spherical padat dengan diameter yang sama, aliran gas akan terblokir oleh masukan dan gas akan mengalir hanya melalui ruang kosong antara partikel padat. (Biswas, 1982) menyusun persamaan untuk perhitungan *pressure drop* sesuai persamaan 2.11.

$$\frac{\Delta P}{H} = \psi \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot d} \cdot \rho_o \cdot w_o^2 \cdot \frac{T}{T_o} \cdot \frac{P_o}{P} \dots \dots \dots (2.11)$$

Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa *pressure drop* atau tahanan terhadap aliran gas menurun dengan:

- a. Peningkatan *voidage*
- b. Peningkatan tekanan pada tekanan kolom
- c. Peningkatan ukuran diameter partikel
- d. Penurunan massa jenis gas
- e. Penurunan kecepatan gas (Biswas, 1982).



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.7 Reaksi Kimia Dan Transformasi Fase Dalam *Blast Furnace*

Sembilan belas reaksi kimia dan sembilan transformasi fasa terjadi pada proses dalam *blast furnace*. Oksida besi dalam bijih besi teroksidasi secara tidak langsung oleh karbon monoksida dan gas hidrogen, sedangkan reduksi secara langsung oleh karbon. Pembakaran dan gasifikasi karbon oleh oksigen yang terdapat pada daerah raceway menghasilkan gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida. Proses pembakaran dan gasifikasi karbon ini terjadi pada saat karbon pada fase solid dan powder (kokas). Karbon digunakan dalam reaksi pembentukan gas hidrogen dan *solution loss* dengan temperatur reaksi berkisar 900 °C (Nogami, 2006).

Reaksi antara gas hidrogen dan gas karbon dioksida menghasilkan produk berupa gas karbon dioksida dan uap air. Reaksi ini adalah reaksi reversible untuk menjaga spesies karbon dan gas hidrogen (Iwanaga, 1991). *Volatile* muncul pada saat kokas pada bentuk *powder* yang homogen bereaksi dengan gas oksigen dan gas karbon dioksida. Reaksi ini terjadi pada daerah pembakaran dan berlangsung dengan sangat cepat.

Rangkuman reaksi kimia dan transformasi fasa yang terjadi selama proses peleburan di *blast furnace* seperti tergambar dalam Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 (Rahmat, 2016)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.1 Reaksi pada proses peleburan bijih besi di *blast furnace*

No	Reaksi Kimia	Keterangan
1.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh CO
2.	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh CO
3	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow w \text{Fe}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustite oleh CO
4.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh H_2
5	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh H_2
6.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow w \text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustit oleh H_2
7.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow w \text{Fe}(\text{l}) + \text{C}(\text{g})$	Reduksi langsung
8	$\text{C}(\text{s}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g})$	Partial combustion
9	$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$	Full combustion
10	$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$	Reaksi solution loss
11	$\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	Reaksi uap air



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

No	Reaksi Kimia	Keterangan
12	$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reaksi pembentukan uap air
13	$\text{Volatile}(\text{f}) + \alpha_1 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_2 \text{CO}_2(\text{g}) + \alpha_3 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \alpha_4 \text{N}_2(\text{g})$	Pemakaran Volatil
14	$\text{Volatile}(\text{f}) + \alpha_1 \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_2 \text{CO}(\text{g}) + \alpha_3 \text{H}_2(\text{g}) + \alpha_4 \text{N}_2(\text{g})$	Reaksi <i>solution loss</i> pada volatil
15	$\text{SiO}_2(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$	Gasifikasi silika pada kokas
16	$\text{SiO}_2(\text{s}) + 3\text{C}(\text{s}) \leftrightarrow \text{SiC}(\text{hm}) + 2\text{CO}(\text{g})$	Reaksi pembentukan SiC
17	$\text{SiC}(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + 2\text{C}(\text{s})$	Reaksi gasifikasi SiC
18	$\text{SiO}_2(\text{slag}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$	Reaksi gasifikasi silka pada slag
19	$\text{SiO}(\text{g}) + \text{C}(\text{hm}) \rightarrow \text{Si}(\text{hm}) + \text{CO}(\text{g})$	Reaksi reduksi SiO



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.2 Reaksi transformasi fasa pada proses peleburan di *blast furnace*

No	Furmula transformasi fasa	Keterangan
1	$\text{H}_2\text{O}(\text{s}) \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Penguapan
2	$\text{Fe}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}(\text{hm})$	Pencairan besi pada ore, sinter, pelet
3	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}_w\text{O}(\text{slag})$	Pencairan wustit pada ore, sinter, pelet
4	$\text{SiO}_2(\text{i}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{slag})$	Pencairan silika pada ore, sinter, pelet
5	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{i}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{slag})$	Pencairan alumina pada ore, sinter, pelet
6	$\text{CaO}(\text{i}) \rightarrow \text{CaO}(\text{slag})$	Pencairan lime pada ore, sinter, pelet
7	$\text{MgO}(\text{i}) \rightarrow \text{MgO}(\text{slag})$	Pencairan magnesia pada ore, sinter, pelet
8	$\text{Scrap} \rightarrow \text{Fe}(\text{hm}) + \text{C}(\text{hm}) + \text{Si}(\text{hm})$	Pencairan scrap
9	$\text{C}(\text{i}) \rightarrow \text{C}(\text{hm})$	Dissolution karbon pada ore, sinter, pellet, kokas

2.8 Pemodelan *Blast Furnace*

2.8.1 Aliran Fase Gas

Persamaan Ergun digunakan untuk menghitung dan memprediksi terjadinya *pressure drop* pada *blast furnace*. Persamaan ini telah banyak di observasi dan diterapkan dalam percobaan dan pemodelan seperti yang dilakukan oleh Castro, Austin dan Hayagi pada penelitian mereka. Dengan menggunakan persamaan Ergun distribusi tekanan pada *blast furnace* dapat di hitung dan diprediksi. Selain empirik dari Ergun persamaan Navier-Stokes juga dapat diterapkan untuk menghitung distribusi tekanan pada fluida yang memiliki viskositas (Nogami, 2006).



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.8.2 Aliran Fase Solid

Untuk pemodelan aliran fase solid dapat menggunakan beberapa metode. *Discrete element method* (DEM) yaitu metode untuk mengakomodir pergerakan kontak partikel. Pada metode ini pergerakan seperti terjadi pada tipe elemen spring (Natsui, 2011). Model lain adalah dengan menggunakan model kinematik, akan tetapi model ini memiliki batasan pada fase solid karena tidak mengakomodir persamaan momentum sehingga model ini hanya mampu mengkalkulasi pada interaksi antar fase. Formulasi lain yang digunakan dalam pemodelan aliran fase solid adalah model *viscos flow*. Model ini memiliki kekurangan untuk memprediksi pergerakan fase solid akan tetapi model ini dapat mengakomodir persamaan momentum dan persamaan kontinuitas antar fase lebih mudah dilakukan. Dengan menggunakan model *viscos flow* maka area deadmen tidak dapat diprediksi sehingga harus menerapkan asumsi dengan menaikkan nilai dari viskositas partikel pada area deadmen. Untuk mengakomodir area deadmen dapat digunakan model teori *hypo-plasticity*. Teori ini berbasis *finite element method* (FEM) untuk memecahkan persoalan tegangan sehingga didapatkan laju deformasi.

2.8.3 Aliran Fase Cair

Fase cair pada *blast furnace* berada pada bagian bawah yaitu logam cair dan slag. Keduanya berinteraksi dengan berbagai fase seperti solid, gas dan partikel halus. Sifat dari logam cair dan slag mengalami perubahan seiring dengan perubahan temperatur dan komposisi kimia akibat terjadinya reaksi kimia pada area kohesif. Untuk pemodelan aliran fase cair dapat digunakan Navier-Stokes. Model ini mengakomodir aliran fase cair pada proses dengan adanya tekanan.

2.9 Analisis Numerik Pada *Blast Furnace* Berdasarkan Teori Multi-Fluid

Pemodelan pada penelitian ini menggunakan teori multi-fluid dimana semua fase seperti fase cair mengalami interaksi dengan momentum, massa dan energi. Jumlah fase dalam



penelitian ini adalah enam. Keenam fase tersebut adalah fase gas, solid (kokas, sinter, ore, pellet, scrap), statik powder (SPC) dan statik powder berukuran halus (SFC), logam cair, slag, dinamik powder (DPC) dan dinamik powder berukuran halus (DFC). Ukuran kokas yang halus merupakan hasil degradasi dari kokas berukuran besar pada *blast furnace*, kokas dengan ukuran yang halus ini masuk dalam powder dinamik dimana akan bereaksi dengan fase lain seperti gas dan fase cair serta mengalami transformasi fisik.

Persamaan yang digunakan untuk pemodelan ini terdiri dari persamaan konservatif massa, momentum, energi panas, dan reaksi kimia dari setiap spesies fase yang ada dalam *blast furnace*. Persamaan konservatif secara keseluruhan yang digunakan dalam model ini seperti tertera dalam persamaan 2.12

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_i \rho_i u_i \phi_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \varepsilon_i \rho_i v_i \phi_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi_i} \dots (2.12)$$

Dimana i adalah fase yang ada dalam pemodelan (gas, solid, kokas, sinter, pellet, scrap, ore, SPC, SFC, logam cair, slag, DPC dan DFC). Γ_{ϕ_i} adalah koefisien transfer yang nilai bergantung pada variable yang ditentukan. Untuk mempermudah penyelesaian persamaan konservatif maka beberapa asumsi dilakukan diantaranya untuk perhitungan laju alir persamaan konservatif momentum menggunakan asumsi dinamik viskositas, untuk perpindahan panas persamaan konservatif energi menggunakan asumsi konduktifitas termal dan konveksi, untuk transfer massa persamaan konservatif masa komposisi yang dihitung pada persamaan 2.1 menggunakan asumsi fraksi massa pada setiap komponen yang akan dihitung.

2.9.1 Persamaan Momentum

Perubahan momentum dari fase gas ke fase solid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Ergun seperti pada persamaan 2.13 (Sungging, 2006)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$F_{g-s} = 150\mu_g \frac{1}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s|} \left[\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)d_g\varphi_g} \right]^2 + 1.75\rho_g \left[\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)d_s\varphi_s} \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

Pada bagian atas *blast furnace*, kokas dan partikel bijih besi/ore dimasukkan membentuk struktur berlapis lapis di dalam *blast furnace*. Akibatnya pada area kohesif tersusun atas beberapa layer dengan sudut kemiringan θ sehingga secara geometri dihitung secara anisotropik sesuai dengan persamaan 2.14-2.16

$$\vec{F}_g = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R_{perp} & 0 \\ 0 & R_{para} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{vmatrix} |\vec{U}_g - \vec{U}_s| (\vec{U}_g - \vec{U}_s) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana R_{perp} dan R_{para} adalah koefisien flow dan paralel untuk struktur layer solid pada area kohesif dimana besarnya R_{perp} dan R_{para} adalah (Hiroshi, 2006)

$$R_{perp} = \sum_k f_k R_k \text{ dan } \left(\frac{1}{\sqrt{R_{para}}} \right) = \sum_k \left(\frac{f_k}{\sqrt{R_k}} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana f_k dan R_k adalah

$$R_k = 150 \mu_g \frac{(1-\varepsilon_g)^2}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s| \varepsilon_g^3 \varphi_s d_s} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g}{\varepsilon_g^3 \varphi_s d_s} \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk momentum dari fase gas ke fase cair dan fase gas ke fase powder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh Richardson dan Zaki (Kmieć, 1976) seperti pada persamaan 2.17

$$\vec{F}_g^i = -C_{d_{g-i}} \left[\frac{3\varepsilon_i \rho_i}{4d_i \varphi_i} \right] |\vec{U}_g - \vec{U}_i| (\vec{U}_g - \vec{U}_i) \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$C_{d_{g-i}} = \left[\frac{24}{\text{Re}_{g-i}} (1 + a \text{Re}_{g-i}^b) + \frac{c}{1 + \frac{d}{\text{Re}_{g-i}}} \left(\frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_i} \right)^{-4,65} \right] \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana i adalah logam cair, slag, powder dan PC. a,b,c,d adalah fungsi bentuk dari partikel (φ) sesuai dengan persamaan 2.19 – 2.22 (Yagi, 2005)

$$\text{Ln (a)} = 2,3288 - 6,4581 \varphi_i + 2,448 \varphi_i^2 \dots\dots\dots (2.19)$$

$$b = 0,0964 + 0,5565 \varphi_i \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\text{ln (c)} = 4,905 - 13,8944 \varphi_i + 18,4222 \varphi_i^2 - 10,2599 \varphi_i^3 \dots\dots (2.21)$$

$$\text{ln (d)} = 1,4681 + 12,2584 \varphi_i - 20,7322 \varphi_i^2 + 15,8855 \varphi_i^3 \dots\dots\dots (2.22)$$

Untuk momentum dari fase solid ke fase cair dapat digunakan persamaan yang digunakan oleh Kozeny-Carman (Wyllie, 1958) dimana fraksi volume fase cair sangat kecil dengan persamaan 2.23-2.25

$$\vec{F}_s' = \frac{\rho_l}{r_h} \left| \vec{U}_l - \vec{U}_s \right| (5\beta + 0,4\beta^{0,1}) (\vec{U}_l - \vec{U}_s) \dots\dots\dots (2.23)$$

Dan nilai dari β adalah

$$\beta = \frac{\mu_l}{\rho_l \left| \vec{U}_l - \vec{U}_s \right| r_h} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana

$$r_h = \frac{\varepsilon_l \varphi_s d_s}{6\varepsilon_s} \dots\dots\dots (2.25)$$



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Untuk fase solid – powder dapat digunakan persamaan 2.26-2.30 yang dikembangkan dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh J Yagi dkk (Yagi, 2005).

$$\vec{F}_s^i = \frac{F_k}{2D} \varepsilon_i \rho_i \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| \left(\vec{U}_i - \vec{U}_s \right) \dots\dots\dots(2.26)$$

Nilai D setara dengan

$$D = \frac{2\phi_s d_s}{3\varepsilon_s} (1 - \varepsilon_s) \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana

$$F_k = \frac{10,5}{F_r^{1,33}} \text{ untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \quad (\text{vertical}) \dots\dots\dots(2.28)$$

$$F_k = \frac{14,98}{F_r^{1,33}} \text{ untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \quad (\text{horizontal}) \dots\dots\dots(2.29)$$

Besarnya nilai F_r dapat dihitung dengan persamaan

$$F_k = \frac{\left| \vec{U}_s - \vec{U}_i \right|}{\sqrt{gD}} \dots\dots\dots(2.30)$$

2.9.2 Persamaan Perpindahan Panas

Dengan asumsi powder statik bergerak bersamaan dengan fase solid maka temperatur powder statik memiliki nilai yang sama dengan fase solid. Oleh karena itu persamaan konservatif dapat diubah menjadi

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) = \dot{E}_{g,sf} + \dot{E}_{lag,sf} + \dot{E}_{hm,sf} + \sum \dot{E}_{n,sf} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana \dot{E} adalah energy yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi pada saat fase yang berbeda melakukan kontak. Energi yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi dapat dihitung dengan



$$E_i^j = h_{i-j} A_{i-j} [T_i - T_j] \dots\dots\dots (2.32)$$

Nilai koefisien konduksi dihitung dengan menggunakan persamaan Ranz – Marshall yang telah dikembangkan oleh Akiyama untuk pergerakan layer. Nilai koefisien konveksi antar fase dapat dihitung menggunakan persamaan 2.33 – 2.41

1. Fase gas - solid

$$h_{g-s} = \frac{k_g}{d_s} \left[2 + 0,39(\text{Re}_{g-s})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3} \right] \dots\dots\dots (2.33)$$

2. Fase gas – cair (di gunakan oleh Mackey dan Warner)

$$h_{g-l} = 4,18 \times 10^{-4} (\varepsilon_g \rho_g u_g) C p_g (\varepsilon_l u_l)^{0,35} (\text{Re}_g)^{-0,37} (\text{Sc}_g / \text{Pr}_g)^{2/3} \dots\dots (2.34)$$

3. Fase solid – cair

$$h_{l-s} = \frac{k_l}{d_s} \left(\frac{2\sqrt{\text{Re Pr}}}{1,55\sqrt{\text{Pr}} + 3,09\sqrt{0,372 - 0,15 \text{Pr}}} \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

4. Fase solid-powder

$$h_{eff} = 2 \sqrt{\frac{k_{eff} (C p_s \rho_s)_{eff}}{\pi t_{c,eff}}} \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana

$$t_{c,eff} = \left(\frac{\varepsilon_g - \varepsilon_i}{U_{eff} |A_s|} \right) \dots\dots\dots (2.37)$$

5. Fase gas – powder



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$h_{g-i} = \frac{k_g}{d_i} \left[2 + 0,6(\text{Re}_{g-i})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3} \right] \dots\dots\dots (2.38)$$

Kontak area merupakan salah satu parameter yang menentukan perpindahan panas secara konveksi. Untuk menghitung luas area kontak material solid dapat menggunakan persamaan 2.39

$$A_s = \sum_m f_m \frac{6\varepsilon_m}{d_m \varphi_m} \dots\dots\dots (2.39)$$

Untuk area solid – cair (slag dan logam cair) perhitungan luas area dapat menggunakan persamaan yang digunakan oleh Niu

$$\frac{A_{s-i}}{A_s} = 0,4 \text{Re}_{s-i}^{0,218} \text{We}_{s-i}^{0,0428} \text{Fr}_i^{-0,0238} [1 + \cos \theta_{s-i}]^{-0,0235} \dots\dots\dots (2.40)$$

Dimana

$$A_{s-i} = \left[\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_g + \sum_i \varepsilon_i} \right] \left[A_s - \sum_l A_{s-l} \right] \dots\dots\dots (2.41)$$

2.9.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik

Powder statik adalah partikel dari arang berukuran kecil yang tidak terbakar akan mengalir bersama dengan aliran fase gas, bergerak masuk melalui celah celah yang ada pada susunan layer fase solid. Walaupun berupa statik powder akan tetapi fase ini tetap dapat terpisah dan bergabung dengan gas sehingga menjadi dinamik. Secara umum pergerakan powder statik ke bagian atas dari *blast furnace* dapat dihitung dengan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

menggunakan persamaan konservatif seperti pada persamaan 2.42.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs} u_{fs}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs}) = R_f \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

Dimana R_f adalah laju reaksi dari powder. Laju reaksi ini oleh Hideka diselesaikan dengan menggunakan perbedaan antara laju pergerakan powder dan laju masuk dari powder dengan persamaan 2.43-2.45.

$$R_f = r_s - r_d = \rho_f (k_f a \varepsilon_f - k_r a \varepsilon_{fs}) \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

Dimana

$$k_f a = \frac{1}{400} \left(1 + \left(\frac{G_g}{G_f} \right)^{-3} \right) d_f^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2.44)$$

$$k_r a = k_f a (\varepsilon_{fo} / \varepsilon_{so}) \quad \dots\dots\dots(2.45)$$

Perhitungan pergerakan ke atas powder dinamik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.46-2.47

$$\varepsilon_{fo} = \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{G_f}{G_f + G_g} \right)^{1.25} \left[200 \exp \left\{ -1.25(u_g - u_z) \left(\frac{G_f}{G_f + G_g} \right) \right\} + 480 d_f^{1/3} \right] \quad \dots\dots(2.46)$$

Dengan nilai

$$G_f = \rho_f u_f \varepsilon_f; G = \rho_g u_g \varepsilon_g; u_z = 0.275 \left(\frac{\rho_g d_f v_{tf}}{\mu_g} \right)^{0.15} \quad \dots\dots(2.47)$$

Perhitungan pergerakan ke atas powder statik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.48



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$\varepsilon_{fso} = 0.007(\varepsilon_g u_g)^{-1.5} G_f^{0.2} \dots\dots\dots(2.48)$$

Dari persamaan 2.42 terdapat penambahan massa yang menyebabkan terjadinya reaksi kimia sehingga laju reaksi powder statik harus ditambahkan pada persamaan 2.42 sehingga persamaan menjadi

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_{sf} \rho_{sf} u_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_s) = R_{chem} + R_f \dots\dots\dots(2.49)$$

R_{chem} adalah laju reaksi pada powder statik.

$$R_{chem} = S_{C,sf} + S_{SiO_2,sf} + S_{Al_2O_3,sf} + S_{CaO,sf} + S_{MgO,sf} \dots\dots\dots(2.50)$$

2.10 MBF *Anyang Steel*

Salah satu MBF yang dikembangkan oleh *Anyang Steel* memiliki *inner volume* 300 m³. Adapun data-data properties dari MBF 300 m³ disajikan dalam Tabel 2.3.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.3 Data dimensi MBF 300 m³ *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

Items	Unit	Parameter
<i>BF Inner volume</i>	m ³	300
<i>Dia.of throat</i>	mm	3700
<i>Dia.of belly</i>	mm	5600
<i>Dia of hearth</i>	mm	4900
<i>Height of throat</i>	mm	1800
<i>Height of shaft</i>	mm	9300
<i>Height of belly</i>	mm	1100
<i>Height of bosh</i>	mm	2800
<i>Height of hearth</i>	mm	2600
<i>Effective working heighth</i>	mm	17600
<i>Bosh angle</i>	°	81,51
<i>Shaft angle</i>	°	84,25

Sedangkan data operasi MBF ditampilkan dalam Tabel 2.4.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.4 Data operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

Descriptions	Unit	Parameters
<i>Produktifitas</i>	$\text{t/m}^3 \cdot \text{d}$	2,611
<i>Smelting Intensity</i>	$\text{t/m}^3 \cdot \text{d}$	1,531
<i>Coke rate</i>	kg/thm	510
<i>PCI rate</i>	kg/thm	76
<i>Fuel rate</i>	kg/thm	586
<i>Top Gas Temperatur</i>	°C	150
<i>Blast Temperature</i>	°C	1100
<i>Oxygen enrichment</i>	%	1,2
<i>Indirect reduction ratio</i>	-	0,52
<i>Hot metal temperature</i>	°C	1450
<i>Si in hot metal</i>	%	0,70
<i>S in hot metal</i>	%	0,03
<i>Slag basicity</i>	-	1,2
<i>Slag volume</i>	Kg/thm	400

Data material balance dari MBF *Anyang Steel* ditunjukkan dalam Tabel 2.5



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.5 *Material balance* dari *Anyang Steel* MBF
(Pandey, 2001)

	Kilogram/ton Hot metal	Persentase (%)
<i>Material Input</i>		
<i>Iron bearing burden</i>	1758	42,7
Flux dan limestone	35	0,8
Kokas	510	12,4
Batubara sebagai PCI	76	1,8
<i>Blast</i> panas	1739	42,2
Total	4118	100
<i>Material Output</i>		
<i>Hot Metal</i>	1000	24,3
<i>Slag</i>	450	10,9
<i>Top Gas</i>	2524	12,4
<i>Moisture</i>	70	1,8
<i>Dust</i>	74	42,2
Total	4118	100

Dalam Tabel 2.6 merupakan data komposisi *burden material* yang digunakan dalam berbagai proses *blast furnace* di cina.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.6 Data komposisi material yang digunakan pada berbagai *blast furnace* di cina (Pandey, 2001)

	Iron Ore	Sinter
Chemical Analysis, %		
Fe	40-45	53-54
FeO	-	11-12
CaO	8	10,5-12
SiO ₂	13-14	8,5-9
Al ₂ O ₃	2	-
MgO	1	2.5
S	0,03-0,04	
Tumbler Index	-	81-82
Basisitas	-	1,2-1,4
Karakteristik Kokas, %		
Ash	13,5-14	
Senyawa Volatil	0,7-1,4	
Sulfur	0,25-0,75	
Moisture	7,5-8,0	
Size (mm)	25-60	



2.11 Penelitian Sebelumnya

2.11.1 Analisa numerik performa *blast furnace* dengan material model baru menggunakan simulator multi-dimensional berdasarakan multi-fluidtheory

Penelitian dilakukan oleh Hiroshi Nogami, Mansheng Chu dan Jun-Ichiro yagi mengenai studi penggunaan Carbon Composite Agglomerates pada *blast furnace* dengan menggunakan simulator *blast furnace* (Nogami, 2005). Pada penelitian tersebut dijelaskan mengenai persamaan-persamaan yang digunakan dalam simulator *blast furnace* dan metode untuk penyelesaian solusi pemodelannya yang juga akan digunakan dalam penelitian kali ini.

2.11.2 Model pemasukan udara pada *blast furnace*

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hellberg, dkk, mengenai injeksi gas pada *blast furnace*. Pada penelitian ini menyimpulkan bahwa temperatur blast akan meningkatkan profil temperatur *blast furnace*. Selain itu dalam penelitian ini juga menjelaskan bahwa laju alir udara yang berlebihan tidak akan terbakar seluruhnya di dalam *blast furnace*.

2.11.3 Pengaruh pemasukan udara terhadap erosi refraktori dengan menggunakan water modelling

Penelitian ini dilakukan oleh Chan-Jeng Su, dkk pada tahun 2010. Kesimpulan dalam penelitian ini yaitu ketika gas *flow rate* rendah maka nilai *erosion rate* pada *refractory* akan turun dan juga Pada kondisi *blowing* yang sama, *erosion rate* pada *refractory* akan turun seiring dengan meningkatnya jumlah tuyere.

2.11.4 Pemodelan CFD *pulvurized coal injection* pada *blast furnace*

Chen Q zhou dalam jurnalnya yang berjudul “ *CFD Modelling For High Rate Pulverized Coal Injection (PCI) to Blast Furnace*” pada tahun 2008, menyimpulkan bahwa:

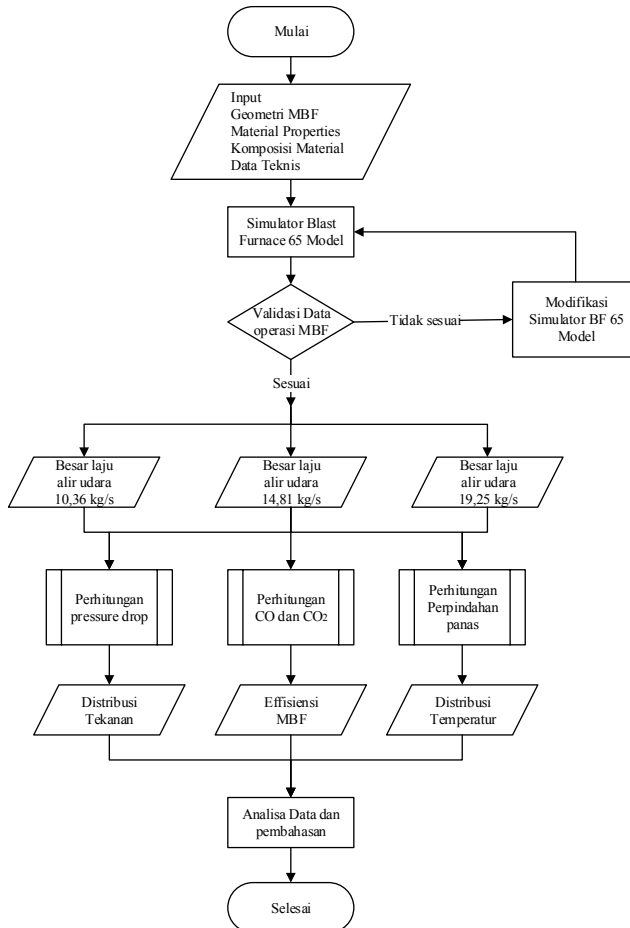


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

- 1 Ukuran *raceway* akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan udara pada tuyer.
- 2 Dengan menggunakan variable kecepatan udara pada tuyere yang tetap, akan terjadi peningkatan ukuran *raceway* seiring dengan peningkatan diameter tuyer.
- 3 Ketika penetrasi masuk lebih ke dalam *furnace*, *raceway* akan mendekati pusat *furnace*.

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian pemodelan MBF dengan variasi laju alir udara



BAB III METODOLOGI

3.2 Prosedur Pemodelan

Pemodelan MBF untuk mengetahui fenomena yang terjadi di dalamnya pada penelitian ini memerlukan beberapa tahapan. Tahapan tahapan ini terbagi dalam tujuh tahapan yaitu:

3.2.1 Persiapan Data

Dalam penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan persiapan data. Persiapan data diperlukan karena dapat menentukan hasil dari perhitungan pada pemodelan yang dilakukan. Data data yang diperlukan diantaranya adalah:

1. Geometri MBF
2. *Material Properties* udara, *burden material*, dan koefisien reaksi
3. Komposisi Bijih Besi dan kokas
4. Data teknis MBF
5. Data variasi laju alir udara adalah 10,36 kg/s, 14,81 kg/s dan 19,25 kg/s.

3.2.2 Perhitungan Mass Balance untuk MBF

Perhitungan mass balance digunakan untuk mendapatkan data input kecepatan bijih besi masuk, kecepatan kokas masuk, kecepatan udara masuk, komposisi bijih besi yang baru karena pada program dianggap semua bijih besi, sinter dan kapur dimasukkan dalam komposisi bijih besi.

3.2.3 Pembuatan Model MBF

Pembuatan model MBF dilakukan dengan menggunakan model dari MBF, sehingga dalam simulator *Blast Furnace* yang digunakan oleh peneliti sebelumnya akan dilakukan perubahan terhadap beberapa bagian berikut:

1. *Working volume* dari MBF

Working volume dari model MBF seperti yang tertera pada keterangan Gambar 3.2 yaitu 300 m³. Pengaturan *working volume* ini dengan jalan memberikan input diameter dan ketinggian pada subprogram *input.dat*.

2. Jumlah dan dimensi Tuyser



Jumlah tuyer yang digunakan pada pemodelan *blast furnace* ini adalah 14 buah. Sama halnya dengan penentuan *working volume*, jumlah tuyer pada model *blast furnace* juga dimasukkan pada subroutine input yang merupakan file masukan untuk memulai perhitungan. Dan juga dilakukan perubahan dimensi tuyere sesuai data MBF.

3.2.4 Validasi dengan Data Trial MBF

Menggunakan hasil data plot dua dimensi dari hasil running simulator *blast furnace* yang telah diubah data inputnya sesuai MBF untuk membandingkan dengan data trial MBF yaitu data operasi MBF *Anyang Steel*.

3.3 Software dan Bahasa Pemrograman

Bahasa pemrograman yang digunakan dalam pemodelan *blast furnace* ini adalah bahasa program fortran. Bahasa program dalam penelitian ini di ambil dari *Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials Tohoku University* melalui peneliti sebelumnya dimana selanjutnya dilakukan modifikasi sesuai dengan parameter penelitian yang dilakukan. Bahasa Program terdiri dari 122 subroutine dengan menitik beratkan pada perhitungan reaksi kimia, perpindahan panas, perhitungan tekanan, perhitungan kecepatan alir pada beberapa fase. Program berbasis fortran ini diberi kode BF65 Model.

3.3.1 Compaq Visual Fortran

Merupakan salah satu compiler (program untuk membuat dan mengeksekusi bahasa fortran) untuk mendapatkan data hasil perhitungan program yang dibuat

3.3.2 Understand

Program untuk memodifikasi BF65 Model agar sesuai untuk penelitian MBF *Anyang Steel* 300 m³.



BAB III METODOLOGI

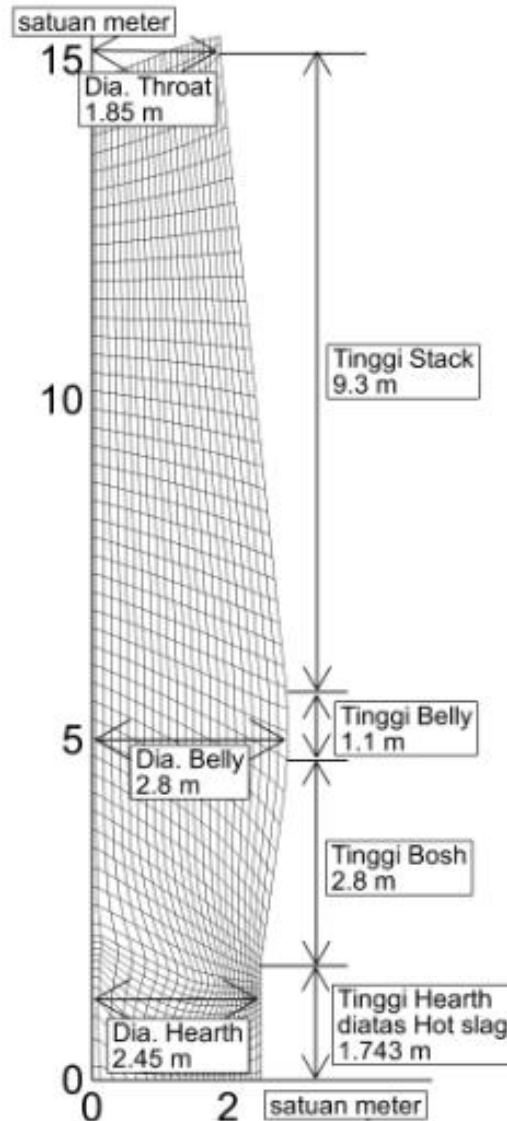
3.3.3 Tecplot 2015

Program untuk menampilkan data visualisasi dua dimensi fenomena di dalam MBF.

3.4 Geometri MBF

Pada penelitian ini pemodelan performa MBF dimulai dengan melakukan pengumpulan data dukung seperti geometri *blast furnace*, Komposisi bijih besi yang akan digunakan dalam produksi, material properties dari bahan yang diumpankan ke dalam MBF, dan kapasitas produksi yang akan digunakan. Pada pemodelan ini volume kerja MBF yang akan digunakan adalah 300 m³ dengan geometri MBF dengan spesifikasi geometri sebagai berikut

1. Tinggi 17,6 meter
2. Diameter dalam 3,7 meter sampai 5,6 meter
3. Jumlah Tuyer 14 buah
4. Diameter Tuyer 4,8 sentimeter
5. Panjang *Nose* Tuyer 3,5 sentimeter
6. Posisi Tuyere 1,3 meter di atas lubang tapping slag



Gambar 3.2 Mesh geometri 2 dimensi MBF



BAB III METODOLOGI

3.5 Komposisi *material* yang digunakan dalam program

3.5.1 Bijih Besi

Masukan persentase bijih besi, sinter dan batu kapur dalam program dianggap sebagai kesatuan dalam inputan bijih besi. Berikut data komposisi bijih besi yang baru hasil campuran dari data komposisi bijih besi, sinter dan batu kapur dari material cina yang telah dijelaskan pada bagian 2.10.

Tabel 3.1 Komposisi bijih besi (Pandey ,2001)

No	Parameter	Unit	Nilai
1	Fe_2O_3	% berat	60,44
2	Fe_3O_4	% berat	1,91
3	FeO	% berat	9,48
4	H_2O	% berat	4,42
5	SiO_2	% berat	9,42
6	Al_2O_3	% berat	0,33
7	MgO	% berat	2,58
8	CaO	% berat	11,41

3.5.2 Kokas

Komposisi kokas yang digunakan dalam program MBF adalah data komposisi dari material cina yang telah dijelaskan pada bagian 2.10.



Tabel 3.2 Komposisi kokas yang digunakan MBF (Pandey, 2001)

No	Komposisi	unit	Nilai
1	C	% berat	77,45
2	H ₂ O	% berat	7,75
3	SiO ₂	% berat	1,05
4	Al ₂ O ₃	% berat	12,53
5	CaO	% berat	0,9
6	MgO	% berat	0,32

3.5.3 PCI (Batubara)

Komposisi PCI yang digunakan dalam program MBF adalah dari data masukan penelitian sebelumnya dengan data laju material masuk tetap dari data *material balance*.

Tabel 3.3 Komposisi PCI (batubara) (Sungging, 2005)

No	Komposisi	unit	Nilai
1	PC <i>Ash</i>	% berat	8,9
2	Total C	% berat	81,1
3	Total H	% berat	4,2
4	Total O	% berat	3,7
5	Total N	% berat	1,6

3.5.4 Udara Panas (*Hot Blast*)

Komposisi gas yang digunakan dalam program MBF adalah data udara umum yang telah dimasukkan pengayaan oksigen sebesar 1.2% seperti dijelaskan dalam data operasi MBF *Anyang Steel* pada bagian 2.10



BAB III METODOLOGI

Tabel 3.4 Komposisi *hot blast* (Pandey, 2001)

No	Komposisi	unit	Nilai
1	O ₂	% berat	22,2
2	N ₂	% berat	77,74
3	H ₂ O	% berat	0,06

3.6 Laju Material Masuk dalam MBF

Dari data *material balance* MBF *Anyang Steel* dibuat data laju konsumsi material persekonnya dikarenakan pada perhitungan digunakan laju material dalam kilogram persekon. Perhitungan laju material berdasarkan data produktifitas dari data MBF *Anyang Steel* (bagian 2.8). Data laju material dapat dilihat pada Tabel 3.5

Tabel 3.5 Laju material masuk (Pandey, 2001)

No	Material Input	Unit	Laju
1	Bijih Besi	Kg/s	15,15
2	Kokas	Kg/s	4,34
3	PCI / batubara	Kg/s	0,65
4	Udara Panas	Kg/s	14,81

3.7 Material Properties

Di dalam *blast furnace* saat beroperasi terdapat berbagai macam fase dari bahan yang diumpankan. Beberapa fase mengalami perubahan dari fase solid menjadi cair dan gas karena pengaruh temperature dan tekanan operasi. Selain itu juga dikarenakan adanya reaksi kimia baik reduksi secara langsung atau reduksi secara tidak langsung. Pada penelitian ini jumlah fase



yang dimodelkan adalah enam fase dengan spesies kimia dan fase seperti tersaji dalam Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Fase dan spesies kimia (Sungging, 2005)

Fase	Spesies Kimia (ω_i)	
Gas	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO,	
Solid	ore	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
	sinter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
	pellet	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
Logam cair	Fe, C, Si	
Slag	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO	
Batu bara dan kokas	C, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, volatil	
Fine ore/flux	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂	

Pada Penelitian ini sifat material pada enam fase dalam model akan dihitung dengan menggunakan pendekatan numerik seperti yang tertera pada bagian 2.9.

3.7.1 Sifat Fase Gas

Berat jenis dari fase gas dihitung menggunakan hukum gas ideal.

$$\rho_g = \frac{P_g}{RT_g} \sum \omega_{j,g} M_j \dots \dots \dots (3.1)$$



BAB III METODOLOGI

Dimana j adalah spesies dari gas. Viskositas dari spesies kimia gas dihitung dengan menggunakan teori statistika mekanika seperti pada persamaan 3.2

$$\mu_g = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{1}{\Omega_{\mu,j}} \sqrt{\frac{M_j T_g}{\sigma_j}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dengan

$$\Omega_{\mu,j} = \frac{1.16145}{(T^*)^{0.14874}} + \frac{0.52487}{\exp(0.7732T^*)} + \frac{2.16178}{\exp(2.43787T^*)} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$T^* = \frac{k_{Boltzman} T_g}{\epsilon_j} \dots \dots \dots (3.4)$$

Untuk konduktivitas termal pada gas dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan Eucken's poliatomik.

$$k_j = M_j \left(C_{P,j} + \frac{5R}{4M_j} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

Pada persamaan 3.6 digunakan untuk menghitung nilai entalpi dan *specific heat* pada fase gas

$$H_g = \sum_{j \in g} \omega_{j,g} \left[\Delta H_{j,g}^{298K} + \int_{298K}^{T_g} C_{P,j}(T) dT \right] \dots \dots \dots (3.6)$$

$$C_{P,j}(T) = a_j + b_j T + c_j T^{-2} \dots \dots \dots (3.7)$$

Koefisien transfer untuk persamaan perhitungan entalpi dihitung dengan persamaan 3.8

$$\Gamma_{H_{gZ}} = \frac{\Delta W k_{g,1}^* + \Delta V k_{g,2}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}}; \Gamma_{H_{gZ}} = \frac{\Delta W k_{g,2}^* + \Delta V k_{g,1}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}} \dots \dots \dots (3.8)$$

Dimana ΔW dan ΔV adalah perbedaan kecepatan antara fase gas dan fase solid pada orientasi vertikal dan horizontal.

Tabel 3.7 Koefisien untuk persamaan *heat capacity* fase gas (Sungging, 2005)

Spesies	a_j [kJ/kmol K]	b_j [kJ/kmol K]. 10^{-3}	c_j [kJ/kmol K]. 10^{-6}
O ₂	25,594	12,251	-4,2050
CO	26,5366	7,683	-1,1719
CO ₂	26,748	42,258	-14,247
H ₂	29,062	-0,82	1,9903
H ₂ O	30,204	9,933	1,117
N ₂	27,016	5,812	-0,289
SiO	33,4176	2,9823	-0,52

Tabel 3.8 Panas pembentukan (kcal/kmol) (Sungging, 2005)

Spesies (gas)	ΔH_i^{298K}
O ₂	0
CO	-26416
CO ₂	-94052
H ₂	0
H ₂ O	-57798
N ₂	0
SiO	-24200

3.7.2 Sifat Fase Solid

Sifat pada fase solid dihitung berdasarkan komposisi dan sifat komponen penyusun dari fase solid itu sendiri. *Specific heat*



BAB III METODOLOGI

dari komponen dan sifat komponen penyusun fase solid dihitung dengan menggunakan persamaan 3.9

$$C_{P,k} = a_k + b_k T_s + \frac{c_k}{T_s^2}; C_{P,S} = \sum_{k \in S} C_{P,k} \omega_{k,S} \dots \dots \dots (3.9)$$

Tabel 3.9 Koefisien untuk persamaan *heat capacity* fase solid dan powder (Castro, 2000)

Spesies	a_j [kcal/kmol K]	b_j [kcal/kmol K ⁻²]	c_j [kcal/kmol K ⁻¹]
Fe ₂ O ₃	24,72	0,01604	-423400
Fe ₃ O ₄	41,17	0,01882	-979500
FewO	12,62	0,00149	-76200
Fe	8,4	0	0
SiO ₂	10,95	0,0055	0
Al ₂ O ₃	22,08	0,00897	-522500
CaO	10	0,00484	-108000
MgO	10,86	0,00119	-208700
C	4,03	0,00114	-204000
SiC	8,89	0,00291	-284000
H ₂ O	18,16	0	0
Volatil	4,03	0,00114	-204000

Untuk perhitungan sifat entalpi dari fase solid menggunakan persamaan 3.10

$$H_s = \sum_{k \in S} \omega_k \left[\Delta H_k^{298K} + \int_{298K}^{T_s} C_{P,k}(T) dT \right] \dots \dots \dots (3.10)$$



Tabel 3.10 Panas pembentukan (kcal/kmol) (Castro, 2000)

Spesies (i)	ΔH_i^{298K}	Spesies (i)	ΔH_i^{298K}
CaO	-151700	Fe ₂ O ₃	-198500
MgO	-143840	Fe ₃ O ₄	-266900
C	-1000	Fe _w O	-64620
SiC	-28000	Fe	0
H ₂ O	-68317	SiO ₂	-217500
Al ₂ O ₃	-399090		

Dimana k adalah kokas, sinter, pellet, dan ore

Konduktivitas termal fase solid pada tiap layer untuk perhitungan perpindahan panas dihitung dengan menggunakan persamaan 3.11 – 3.14

$$k_{s,\text{eff}} = (1 - \varepsilon_s)(k_g + a) + \varepsilon_s \left[\frac{2}{3k_s} + \left(\frac{k_g}{0.274} + b \right)^{-1} \right]^{-1} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$a = \alpha \left[1 + \left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s} \right) \left(\frac{1 - e_s}{2e_s} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$b = \alpha \left(\frac{e_s}{2 - e_s} \right) \dots\dots\dots(3.13)$$

$$\alpha = 0.1952 d_s \left(\frac{T_s}{100} \right)^3 \left(\frac{4.184}{3600} \right) \dots\dots\dots(3.14)$$

3.7.3 Sifat Logam Cair

Berat jenis, viskositas dan konduktivitas termal dari logam cair bergantung dari temperatur. Perubahan temperatur akan membuat nilai sifat sifat tersebut menjadi berubah (Yagi, 2000).



BAB III METODOLOGI

$$\rho_{hm} = 8586 - 0.8577T_{hm} - \frac{6300\omega_{C,hm}}{\omega_{C,hm} + \omega_{Fe,hm} + \omega_{Si,hm}} \dots\dots(3.15)$$

$$k_{hm} = 0.0158T_{hm} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\mu_{hm} = 0.0967 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{58.9 \times 10^3}{8.314T_{hm}}\right) \dots\dots\dots(3.17)$$

3.7.4 Sifat Slag cair

Berat jenis dan konduktivitas termal slag diasumsikan konstan. Untuk viskositas dari slag tergantung dari komposisi komponen pembentuk slag dan temperatur. Persamaan 3.18–3.20 digunakan untuk menghitung ketiga sifat dari slag saat proses peleburan di *blast furnace*.

$$k_{slg} = 0.57 \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\mu_{slg} = 0.1 \times 10^{p^+} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\begin{aligned} p^+ = & 1.7089 \left(\frac{\omega_{CaO,slg}}{\omega_{SiO_2,slg}} \right)^2 - 4.7419 \left(\frac{\omega_{CaO,slg}}{\omega_{SiO_2,slg}} \right) + 0.9331 (\omega_{MgO,slg})^2 \\ & - 0.18862 (\omega_{MgO,slg}) + 7.99 (\omega_{Al_2O_3,slg})^2 - 1.0317 (\omega_{Al_2O_3,slg}) \\ & + \frac{4.2687 \times 10^6}{(T_{slg} - 273.15)^2} + \frac{2.6754 \times 10^3}{T_{slg} - 273.15} + 0.2575 \dots\dots\dots \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.7.5 Sifat Powder

Faktor bentuk dan diameter, dan berat jenis dari powder diasumsikan konstan dan secara spesifik digunakan sebagai data



inputan pada program. Spesifik heat dan temperatur dihitung sama dengan fase solid.

Tabel 3.11 Parameter powder pada pemodelan (Nogami, 2006).

Diameter (m)	10^{-4}
Berat Jenis (kg/m^3)	500
Faktor Bentuk	1

Tabel 3.12 Berat molekuler (kg/kmol) (Nogami, 2006)

M_{Fe}	55,85	M_{H}	1.008	M_{Mg}	24.31
M_{O}	16	M_{C}	12.01	M_{Al}	26.98
M_{N}	14.01	M_{Si}	28.09	M_{Ca}	40.08

3.8 Persamaan Inputan pada Pemodelan

Berdasarkan persamaan konservatif jumlah kualitatif material umpan dan penambahan massa mengakibatkan terjadinya reaksi kimia dan transformasi fase. Seperti yang dijelaskan pada bab 2 dalam penelitian ini terdapat sembilan belas reaksi kimia dan sembilan transformasi fase. Momentum terjadi karena perbedaan tekanan pada beberapa fase (fase gas ,solid) dan gravitasi. Entalpi muncul karena adanya perpindahan panas antar fase, panas karena reaksi dan panas yang menyertai transport massa yang mengakibatkan reaksi kimia dan transformasi fase. Pada Tabel 3.13 merangkum semua inputan momentum pada semua fase, Tabel 3.14 menyantumkan persamaan energi yang digunakan, dan Tabel 3.15 mencantumkan persamaan input yang digunakan sebagai inputan persamaan reaksi kimia.



BAB III METODOLOGI

Tabel 3.13 Persamaan momentum tiap fase (Castro, 2000)

Fase	Persamaan momentum
Gas	$S_\phi = -\text{grad}[P_g] - \vec{F}_g^s - \vec{F}_g^{\text{hm}} - \vec{F}_g^{\text{slg}} - \vec{F}_g^{\text{pc}} - \vec{F}_g^{\text{f}}$
Solid	$S_\phi = -\text{grad}[P_s] - \vec{F}_s^g$
Logam cair	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{hm}}^s - \vec{F}_{\text{hm}}^g + \rho_{\text{hm}} \varepsilon_{\text{hm}} \vec{g}$
PCI	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{pc}}^s - \vec{F}_{\text{pc}}^g + \rho_{\text{pc}} \varepsilon_{\text{pc}} \vec{g}$
Slag	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{slg}}^s - \vec{F}_{\text{slg}}^g + \rho_{\text{slg}} \varepsilon_{\text{slg}} \vec{g}$
Fines/Flux	$S_\phi = -\vec{F}_f^s - \vec{F}_f^g + \rho_f \varepsilon_f \vec{g}$

Tabel 3.14 Persamaan energi setiap fase (Castro, 2000)

Phase	Source term
Gas	$S_\phi = -\dot{E}_g^s - \dot{E}_g^{\text{hm}} - \dot{E}_g^{\text{slg}} - \dot{E}_g^{\text{pc}} - \dot{E}_g^{\text{f}} + \sum R_n \Delta H_n$
Solid	$S_\phi = -\dot{E}_s^g - \dot{E}_s^{\text{hm}} - \dot{E}_s^{\text{slg}} - \dot{E}_s^{\text{pc}} - \dot{E}_s^{\text{f}} + \sum R_n \Delta H_n$
Hot metal	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{hm}}^g - \dot{E}_{\text{hm}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Arang	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{pc}}^g - \dot{E}_{\text{pc}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Slag	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{slg}}^g - \dot{E}_{\text{slg}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Fines/flux	$S_\phi = -\dot{E}_f^g - \dot{E}_f^s + \sum R_n \Delta H_n$



Tabel 3.15 Persamaan fraksi massa dari setiap spesies kimia
(Castro, 2000)

Spesies	Persamaan
CO	$S_{\text{CO}} = M_{\text{CO}} \left(\begin{aligned} &-R_{1_i} - R_{2_i} - R_{3_i} + R_{7_i} + R_{8_i} + 2R_{10_i} + R_{11_i} + R_{12_i} + \alpha_6 R_{14_i} + R_{15_i} \\ &+ 2R_{16_i} + R_{18_i} - R_{17_i} + R_{18_i} + R_{19_i} + R_{20_i} + 2R_{21_i} + 2R_{22_i} + 4R_{23_i} + 3R_{24_i} \\ &+ 6R_{25_i} + 4R_{26_i} + 8R_{27_i} \end{aligned} \right)$
CO ₂	$S_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2} \left(\begin{aligned} &+ R_{1_i} + R_{2_i} + R_{3_i} + R_9 - R_{10_i} - R_{12_i} + \alpha_2 R_{13_i} \\ &- \alpha_5 R_{14_i} - R_{21_i} - 2R_{23_i} - 3R_{25_i} - 4R_{27_i} \end{aligned} \right)$
H ₂	$S_{\text{H}_2} = M_{\text{H}_2} \left(\begin{aligned} &-R_{4_i} - R_{5_i} - R_{6_i} + R_{11_i} - R_{12_i} + \alpha_7 R_{14_i} + 2R_{20_i} \\ &+ 2R_{21_i} + 3R_{22_i} + 3R_{23_i} + 4R_{24_i} + 4R_{25_i} + 5R_{26_i} + 5R_{27_i} \end{aligned} \right)$
H ₂ O	$S_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \left(+R_{4_i} + R_{5_i} + R_{6_i} - R_{11_i} + R_{12_i} + \alpha_3 R_{13_i} \right)$
N ₂	$S_{\text{N}_2} = M_{\text{N}_2} \left(\alpha_4 R_{13_i} + \alpha_8 R_{14_i} \right)$
O ₂	$S_{\text{O}_2} = M_{\text{O}_2} \left(-0.5R_{8_i} - R_{9_i} - \alpha_1 R_{13_i} - 0.5R_{20_i} - R_{22_i} - 1.5R_{24_i} - 2R_{26_i} \right)$
SiO	$S_{\text{SiO}} = M_{\text{SiO}} \left(R_{15_i} + R_{17_i} + R_{18_i} - R_{19_i} \right)$
CH ₄	$S_{\text{CH}_4} = M_{\text{CH}_4} \left(-R_{20_i} - R_{21_i} \right)$
C ₂ H ₆	$S_{\text{C}_2\text{H}_6} = M_{\text{C}_2\text{H}_6} \left(-R_{22_i} - R_{23_i} \right)$
C ₃ H ₈	$S_{\text{C}_3\text{H}_8} = M_{\text{C}_3\text{H}_8} \left(-R_{24_i} - R_{25_i} \right)$
C ₄ H ₁₀	$S_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \left(-R_{26_i} - R_{27_i} \right)$
Fe(<i>i</i>)	$S_{\text{Fe}(i)} = M_{\text{Fe}(i)} \left(wR_{3_i} + wR_{6_i} - R_{28_i} \right)$
Fe _w O(<i>i</i>)	$S_{\text{Fe}_w\text{O}(i)} = M_{\text{Fe}_w\text{O}(i)} \left(\frac{3}{4w-3} R_{2_i} + \frac{3}{4w-3} R_{5_i} - R_{29_i} \right)$
Fe ₃ O ₄ (<i>i</i>)	$S_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)} = M_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)} \left(-\frac{w}{4w-3} R_{2_i} - \frac{w}{4w-3} R_{5_i} + R_{1_i} + R_{4_i} \right)$
Fe ₂ O ₃ (<i>i</i>)	$S_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)} = M_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)} \left(-R_{1_i} - R_{4_i} \right)$
SiO ₂ (<i>i</i>)	$S_{\text{SiO}_2(i)} = M_{\text{SiO}_2(i)} \left(-R_{15_i} - R_{16_i} - R_{30_i} \right)$
Al ₂ O ₃ (<i>i</i>)	$S_{\text{Al}_2\text{O}_3(i)} = -M_{\text{Al}_2\text{O}_3(i)} R_{31_i}$
CaO(<i>i</i>)	$S_{\text{CaO}(i)} = -M_{\text{CaO}(i)} R_{32_i}$



BAB III METODOLOGI

Spesies	Persamaan
$\text{MgO}(i)$	$S_{\text{MgO}(i)} = -M_{\text{MgO}(i)} R_{33_i}$
$\text{H}_2\text{O}(i)$	$S_{\text{H}_2\text{O}(i)} = -M_{\text{H}_2\text{O}(i)} R_{37_i}$
$\text{C}_{(\text{coke})}$	$S_{\text{C}_{(\text{coke})}} = M_{\text{C}}(-R_8 - R_9 - R_{10} - R_{11} - R_{15} - 3R_{16} + 2R_{17} - R_{18} - R_{19} - R_{36})$
$\text{C}_{(\text{pc})}$	$S_{\text{C}_{(\text{pc})}} = M_{\text{C}}(-R_8 - R_9 - R_{10} - R_{11})$
$\text{VM}_{(\text{pc})}$	$S_{\text{VM}_{(\text{pc})}} = M_{\text{VM}}(-R_{13} - R_{14})$
$\text{SiC}_{(\text{coke})}$	$S_{\text{SiC}_{(\text{coke})}} = M_{\text{SiC}_{(\text{coke})}}(R_{16} - R_{17})$
$\text{gangue}(i)$	$S_{\text{gangue}(i)} = -M_{\text{gangue}(i)} R_{35_i}$
$(i = \text{ore, sinter, pelet, coke, arang, dan powder})$	
$\text{Fe}_{(\text{hm})}$	$S_{\text{Fe}} = M_{\text{Fe}}(R_{28_i} + R_{34})$
$\text{C}_{(\text{hm})}$	$S_{\text{C}} = M_{\text{C}}(R_{36} - R_{19})$
$\text{Si}_{(\text{hm})}$	$S_{\text{Si}} = M_{\text{Si}}(R_{19} + R_{34})$
$\text{CaO}_{(\text{slag})}$	$M_{\text{CaO}} R_{32_i}$
$\text{SiO}_2_{(\text{slag})}$	$M_{\text{SiO}_2}(R_{30_i} - R_{18})$
$\text{Al}_2\text{O}_3_{(\text{slag})}$	$M_{\text{Al}_2\text{O}_3} R_{31_i}$
$\text{MgO}_{(\text{slag})}$	$M_{\text{MgO}} R_{33_i}$
$\text{Fe}_w\text{O}_{(\text{slag})}$	$M_{\text{Fe}_w\text{O}}(R_{29_i} - R_{7_i})$
$\text{Gangue}_{(\text{slag})}$	$M_{\text{gangue}} R_{35_i}$

Tabel 3.16 Berat molekuler (kg/kmol) (Castro,2000)

M_{Fe}	55,85	M_{H}	1.008	M_{Mg}	24.31
M_{O}	16	M_{C}	12.01	M_{Al}	26.98
M_{N}	14.01	M_{Si}	28.09	M_{Ca}	40.08

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Pemodelan MBF

Dalam validasi pemodelan ini akan dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan secara pemodelan dengan data eksperimental. Validasi data yang akan dilakukan pada distribusi temperatur dan data operasi. Data eksperimen untuk distribusi temperatur diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Sungging, J Yagi dan H Nogami. Sedangkan data eksperimen untuk data operasi diperoleh dari data operasi MBF Anyang.

4.1.1 Validasi Program BF65 Model dengan Data Distribusi Temperatur Penelitian Sungging, H. Nogami, J.I. Yagi

Pada program yang digunakan memiliki masukan berupa data geometri, *material balance*, *material properties* dan juga data operasi, dimana masukan data tersebut dapat diubah sesuai model *blast furnace* yang digunakan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Sungging dan Nogami (Sungging, 2005) model yang digunakan yaitu *blast furnace* dengan ukuran *working volume* sebesar 4550 m³. Pada penelitian ini dilakukan validasi program dengan membandingkan data distribusi temperatur dari hasil perhitungan secara pemodelan dengan data eksperimental yang telah dilakukan peneliti sebelumnya (Castro, 2000) dan (Sungging, 2005). Pada Tabel 4.1 merupakan parameter operasi yang di gunakan dalam *blast furnace* 4550 m³.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

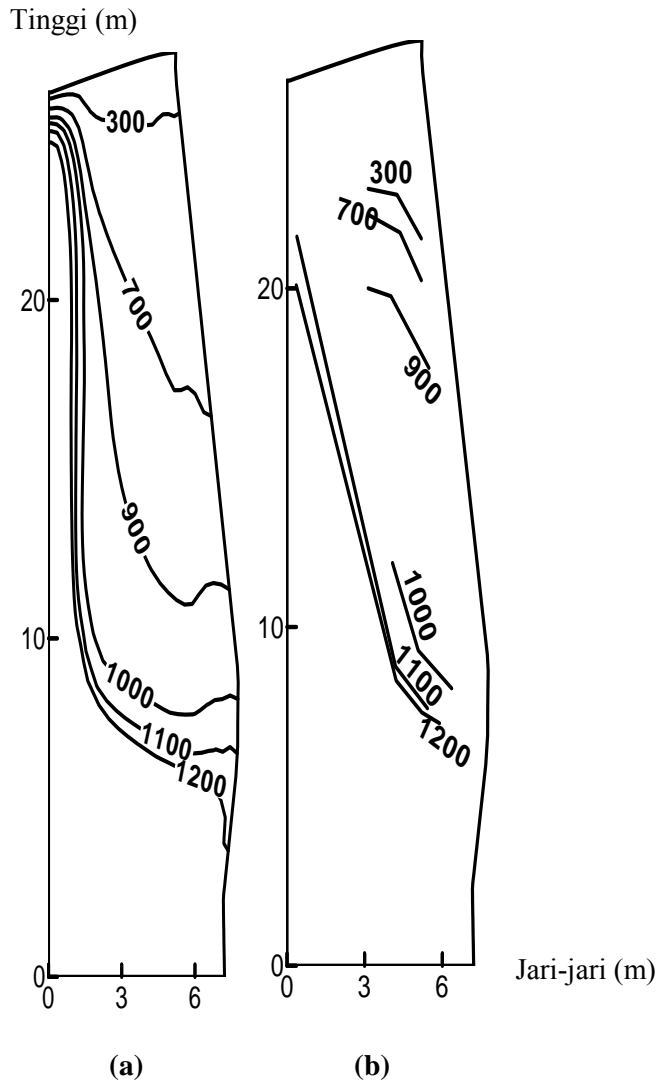
Tabel 4.1 Parameter operasi *blast furnace* 4550 m³
(Sungging, 2005)

Parameter	Unit	Nilai
Tekanan gas pada bagian atas	Atm	2,64
Produktifitas	kg/s	106,6
Oksigen (O ₂)	%	3
Effisiensi pembakaran	%	73
Kecepatan umpan serbuk reduktor	Kg/s	200
Ukuran diameter serbuk reduktor	M	0,0001

Hasil pemodelan pada penelitian Sungging (2005) dan Castro (2000) divalidasi dengan pengukuran distribusi temperatur pada *blast furnace* dengan menggunakan termokopel. Walaupun pada penelitian mereka menyebutkan validasi hanya dapat dilakukan pada temperatur maksimal 1200 °C sedangkan temperatur di atas ini tidak dapat dilakukan pengukuran diameter karena keterbatasan peralatan ukur pada saat itu. Berikut ini hasil perbandingan distribusi temperatur secara pemodelan dengan distribusi temperatur eksperimental (Sungging, 2005).



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.1 Perbandingan (a) hasil perhitungan dan (b) hasil pengukuran distribusi temperatur (Sungging,dkk, 2005)



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Dari Gambar 4.1 perbedaan perhitungan dan pengukuran temperatur memiliki pola distribusi dan besaran yang relatif sama. Pada hasil pengukuran temperatur di dapatkan area distribusi temperatur pada range 900 – 1000 °C memiliki luas area yang relatif besar dibanding yang lain, area ini disebut sebagai HTRZ (*High Temperatur Thermal Reserve Zone*), sedangkan pada perhitungan didapatkan luas area yang lebih kecil. Luasan HTRZ dipengaruhi oleh permeabilitas dari bahan yang berada pada area tersebut, perbedaan luas antara perhitungan dan pengukuran temperatur kemungkinan besar dikarenakan perbedaan dari sifat permeabilitas material pada area ini. Hal ini karena nilai dari sifat material antara perhitungan dan pengukuran diameter terdapat perbedaan. Perbedaan ini dikarenakan ketidak homogenan sifat material yang ada pada keadaan eksperimental, karena akan sangat sulit melakukan homogenisasi bahan yang diumpankan pada *blast furnace*. Ketidakhomogenan yang dimaksud contohnya pada *blast furnace* digunakan material dengan ukuran diameter kokas dan juga bijih besi yang tidak sama (perbedaan ukurannya cukup signifikan) contohnya rentang ukuran kokas bervariasi dari 25 mm sampai 70 mm padahal pada pemodelan hanya digunakan diameter kokas 48 ± 4 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa validasi dengan menggunakan data pengukuran temperatur dengan termokopel tersebut masih harus dilakukan validasi lebih lanjut dengan menggunakan data operasional MBF *Anyang Steel* dengan memperhatikan nilai error yang dihasilkan.

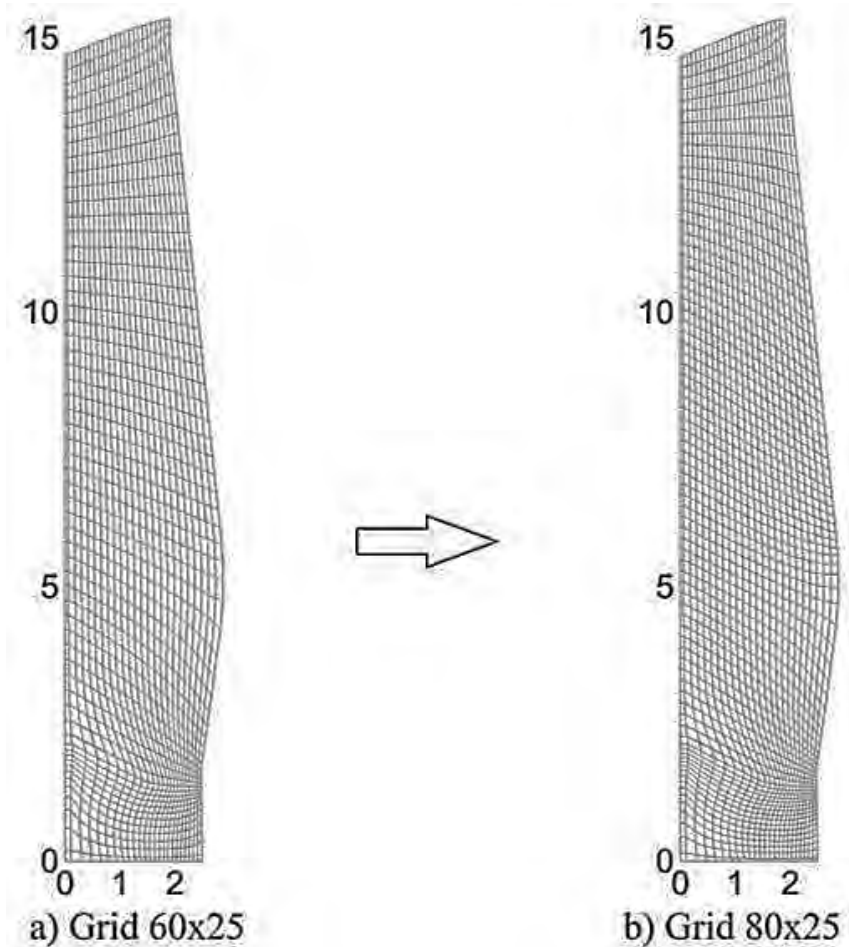
4.1.2 Validasi dengan Data Operasional dari MBF *Anyang Steel*

Pada penelitian saat ini program *blast furnace* tersebut dilakukan upaya *scaledown* dikarenakan kebutuhan penelitian di Indonesia yang membutuhkan pembelajaran fenomena yang terjadi di dalam MBF sebagaimana diketahui pengembangan MBF yang cocok untuk industri skala kecil sedang digencarkan untuk menambah tingkat perekonomian Indonesia dibidang pertambangan mineral. Adapun dalam penelitian ini digunakan



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

data dari MBF Cina yaitu dari *Anyang Steel* dengan kapasitas *working volume* 300 m³. Pada proses pemasukan data teknis dalam program BF65 model terdapat hasil error dari data produksi yang cukup besar sehingga dalam program pemodelan dilakukan modifikasi sedemikian rupa agar validasi dapat diterima sehingga fenomena MBF bisa diketahui. Dalam penelitian ini program BF65 dilakukan modifikasi dengan mengubah parameter grid dari grid awal yang digunakan pada penelitian sebelumnya yaitu 60x25 menjadi 80x25. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan linearitas ketinggian dan jari-jari *blast furnace* yang digunakan pada penelitian sebelumnya dengan MBF milik *Anyang Steel*. Perbedaan proses *mesh* (metode untuk penyelesaian persamaan multidimensi / *finite volume method*) dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Perbedaan grid setelah modifikasi program [m]

Pada modifikasi *mesh* pada Gambar 4.2 terlihat bahwa grid yang ditampilkan pada grid yang baru lebih banyak dan mendekati bentuk persegi sehingga pada penyelesaian solusinya tidak menghasilkan distorsi dan error yang besar dibandingkan



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

dengan grid yang digunakan pada penelitian Sungging dan Nogami (Sungging, 2005).

Pada penelitian ini inputan data merujuk pada data operasi MBF *Anyang Steel*, sehingga dapat diketahui kevalidan dari proses pemodelan dengan membandingkan hasil perhitungan secara pemodelan dengan data operasi MBF *Anyang Steel*. Data operasi MBF *Anyang Steel* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

Parameter	Unit	Nilai
Laju Umpan <i>Burden Material</i>	Kg/thm	1758
Laju Umpan <i>Flux/limestone</i>	Kg/thm	35
Laju Umpan Kokas	Kg/thm	510
Laju Umpan <i>Pulvurized Coal</i>	Kg/thm	76
Temperatur <i>Blast</i>	°C	1100
Oksigen (O ₂)	%	1,2
<i>Blast Rate</i>	Kg/thm	1739
Ukuran Kokas	mm	25-60 (48)

Dengan menggunakan parameter operasi yang sama, dilakukan perhitungan dengan menggunakan pemodelan. Hasil dari perbandingan perhitungan secara pemodelan dan data operasi MBF *Anyang Steel* dapat dilihat pada Tabel 4.3.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan dan pengukuran MBF
Anyang Steel

Parameter Operasi	Satuan	Hasil pengukuran	Hasil Perhitungan Pemodelan	Error
Produktifitas	t/m ³ /d	2,611	2,6136	0,1%
Laju Slag	Kg/thm	524	519,875	0,78%
Laju Gas Buang	Kg/thm	2594	2573,626	0,79%
Temperatur Gas Buang	°C	150	150,09	0,06%
Kandungan Si dalam Hot Metal	%	0,70	0.644	8%

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa error maksimal yaitu 8%. Dengan menggunakan *margin error* sebesar 10% (Wonnacott, 1972) maka dapat disimpulkan bahwa program pemodelan hasil modifikasi BF65 Model untuk penelitian MBF *Anyang Steel* telah layak untuk digunakan.

4.2 Data Fenomena Fisik MBF dengan Variabel Laju Alir Udara

Dalam Penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh variasi laju alir udara terhadap fenomena MBF. Pengaruh laju alir udara yang akan diteliti pada penelitian ini yaitu pada distribusi temperatur, distribusi tekanan dan distribusi gas CO dan CO₂.

4.2.1 Analisa Distribusi Temperatur

Panas merupakan kebutuhan yang sangat penting di dalam operasi MBF. Sumber panas di dalam MBF berasal dari pembakaran batu bara oleh gas oksigen. Gas oksigen ini di suplai dari udara luar yang telah dipanaskan terlebih dahulu di dalam *hot*



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

stoves. Sejumlah udara luar akan diinjeksikan ke dalam MBF melalui lubang tuyer (Biswas, 1981).

Gas oksigen yang telah diinjeksikan melalui tuyer akan bereaksi dengan batu bara membentuk gas reduktor yaitu gas karbon monoksida. Reaksi antara gas oksigen dan batu bara ini berlangsung secara eksotermis. Reaksi eksotermis sendiri merupakan reaksi yang menghasilkan panas. Gas karbon monoksida yang terbentuk akan bergerak naik untuk mereduksi bijih besi yang dimasukkan melalui *throat* pada MBF sesuai dengan prinsip *counter current reactor*.

Kebutuhan dan konsumsi panas pada tiap daerah di dalam MBF berbeda-beda sehingga akan membentuk sebuah profil temperatur. Profil temperatur di dalam MBF akan mempengaruhi keseluruhan operasi di dalam MBF termasuk produktifitas. Menurut Biswas (1981), salah satu faktor yang mempengaruhi profil temperatur MBF yaitu laju alir udara.

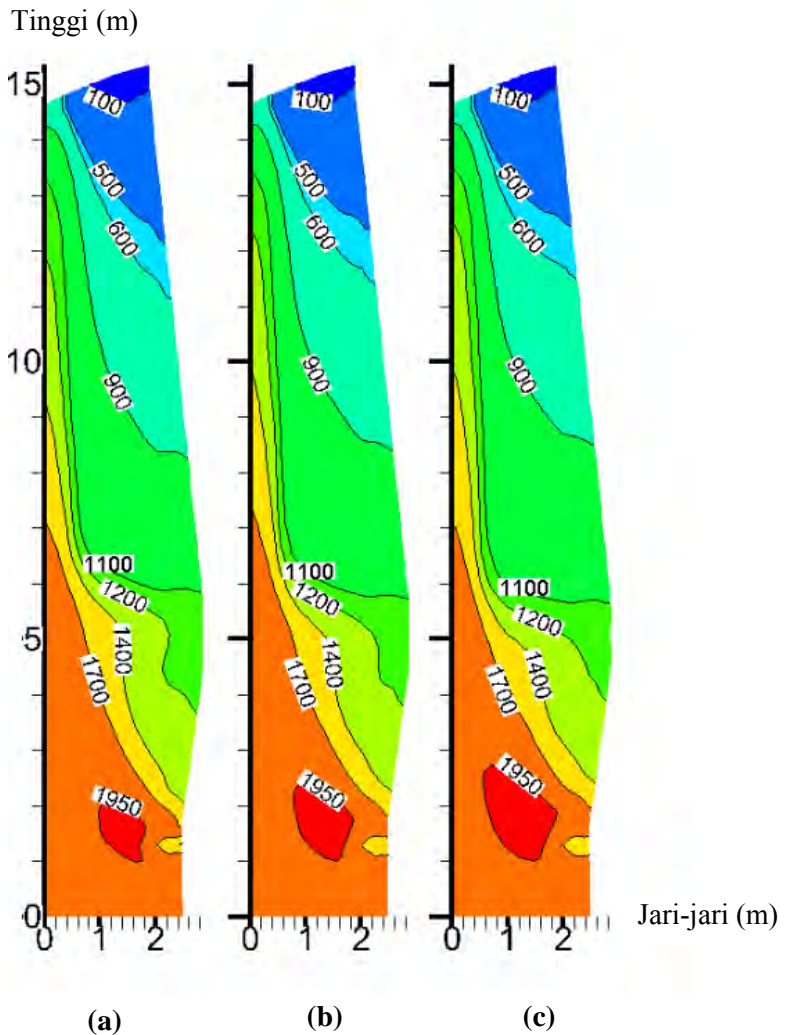
Untuk mengetahui pengaruh laju alir udara terhadap profil temperatur dari MBF dilakukan simulasi menggunakan parameter operasi MBF dengan memvariasikan besar laju alir udara yang ditiupkan ke dalam MBF. Variasi besar laju alir udara yaitu dengan nilai sebesar 10,36 kg/s (-30%), 14,81 kg/s (0%) dan 19,25 kg/s (30%) seperti yang tertera pada tabel parameter operasi berikut ini.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.4 Parameter operasi yang digunakan dalam pemodelan

Parameter	Unit	Nilai
Tekanan gas pada bagian atas	Atm	1,137
Temperatur <i>hot blast</i>	⁰ C	1100
Kecepatan <i>pulverized coal</i>	kg/s	0,684
Kecepatan umpan kokas	Kg/s	4,59
Diameter kokas	m	0,048
Oksigen (O ₂)	%	1,2
Kecepatan laju alir udara	Kg/s	Simulasi 1 :10,36 Simulasi 2 :14,81 Simulasi 3 :19,25



Gambar 4.3 Perbandingan distribusi temperatur dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan dengan menggunakan pemodelan menghasilkan profil temperatur seperti pada Gambar 4.3. Berdasarkan Gambar 4.3, dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan temperatur yang tidak terlalu signifikan seiring dengan meningkatnya laju alir udara. Peningkatan temperatur terjadi pada area dengan temperatur 1950 °C, dimana area temperatur 1950 °C dengan laju alir udara 10,36 kg/s lebih kecil dibandingkan dengan laju alir udara 19,25 kg/s dan begitu pula luasan area temperatur 1900 °C dengan laju alir udara 19.25 kg/s lebih luas dibandingkan dengan laju alir udara 14,81 kg/s.

Hal ini sesuai dengan teori yang ada bahwa peningkatan laju alir udara akan meningkatkan profil temperatur disebabkan kecepatan pembakaran kokas atau batu bara menjadi lebih cepat (patterson,dkk, 1961). Jika laju alir udara semakin banyak maka suplai oksigen ke dalam MBF juga semakin banyak. Hal ini akan mengakibatkan jumlah oksigen yang bereaksi dengan batu bara akan semakin banyak sehingga panas yang dihasilkan semakin besar. Akibatnya akan terjadi peningkatan temperatur didalam MBF.

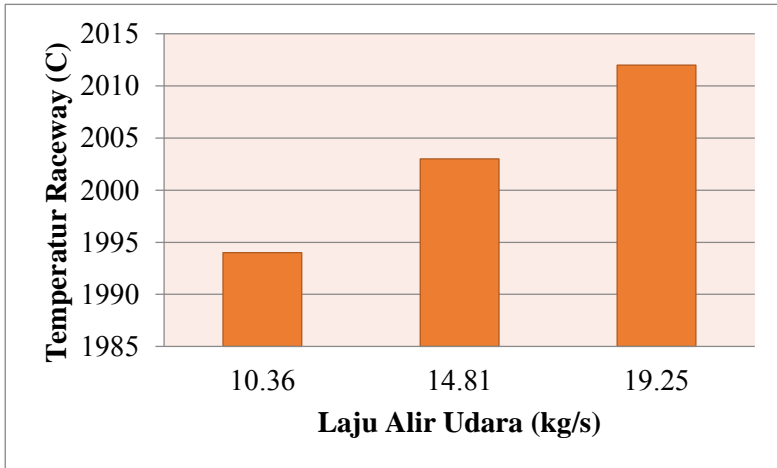
Peningkatan temperatur yang signifikan hanya pada bagian bawah karena menurut penelitian Heynert dan Willems (1959), konsumsi oksigen sangat besar pada daerah ini yaitu mencapai 90 % dari jumlah oksigen yang diinjeksikan. Dengan penambahan laju alir udara maka oksigen pada bagian bawah akan mengalami peningkatan yang lebih signifikan bila dibandingkan dengan peningkatan oksigen di daerah bagian tengah maupun daerah bagian atas MBF.

Perbedaan distribusi temperatur pada bagian bawah dikarenakan adanya peningkatan *Raceway Adiabatic Flame Temperature* (RAFT) yang tidak signifikan pula. Daerah *raceway* merupakan daerah kosong atau *cavity* yang memiliki temperatur tertinggi di dalam *mini blast furnace*. Menurut Geerdes (2009), hal ini terjadi karena jumlah oksigen yang meningkat di dalam mini blast furnace akan meningkatkan *Raceway Adiabatic Flame Temperature* (RAFT). Berikut ini diagram nilai *Raceway*



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Adiabatic Flame Temperature (RAFT) dengan menggunakan perhitungan dengan pemodelan.



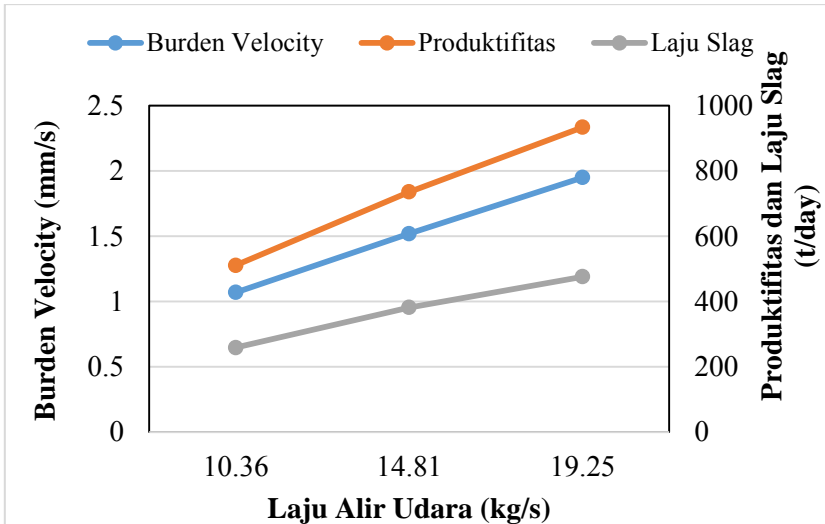
Gambar 4.4 Grafik peningkatan *raceway adiabatic flame temperature*

Temperatur pada bagian atas MBF digunakan untuk *preheating burden material*. Dari Gambar 4.3, bisa terlihat bahwa temperatur terendah dari MBF terjadi di daerah ini. Dari perhitungan pemodelan tidak terjadi perbedaan karena pengaruh variasi laju alir udara. Hal ini karena adanya daerah *isothermal zone* atau *reverse zone* yang terbentuk pada mini blast furnace. Daerah *isothermal zone* atau *reverse zone* ini memiliki perpindahan panas yang sangat sedikit (Kitaev, 1967).

Peningkatan temperatur pada MBF akan berpengaruh terhadap kecepatan burden material turun dan juga produktifitas. Hal ini ditunjukkan dalam grafik berikut ini



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.5 Grafik peningkatan kecepatan *burden material* turun, peningkatan produktifitas dan peningkatan laju slag

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa kecepatan *burden material* turun dari bagian atas MBF menuju bagian bawah MBF akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan laju alir udara. Kenaikan kecepatan burden ini karena adanya kenaikan kecepatan pembakaran *burden material*. Selain itu menurut Biswas (1981), Kenaikan kecepatan *burden* juga disebabkan oleh peningkatan kecepatan pelelehan dari logam karena kenaikan profil temperatur. Kecepatan burden material ini sangat penting, karena semakin cepat *burden material* yang turun maka dalam satu hari akan semakin banyak burden material yang diproses sehingga akan meningkatkan produktifitas *hot metal*. Selain itu jumlah *burden material* yang semakin banyak diolah akan membuat laju slag meningkat.

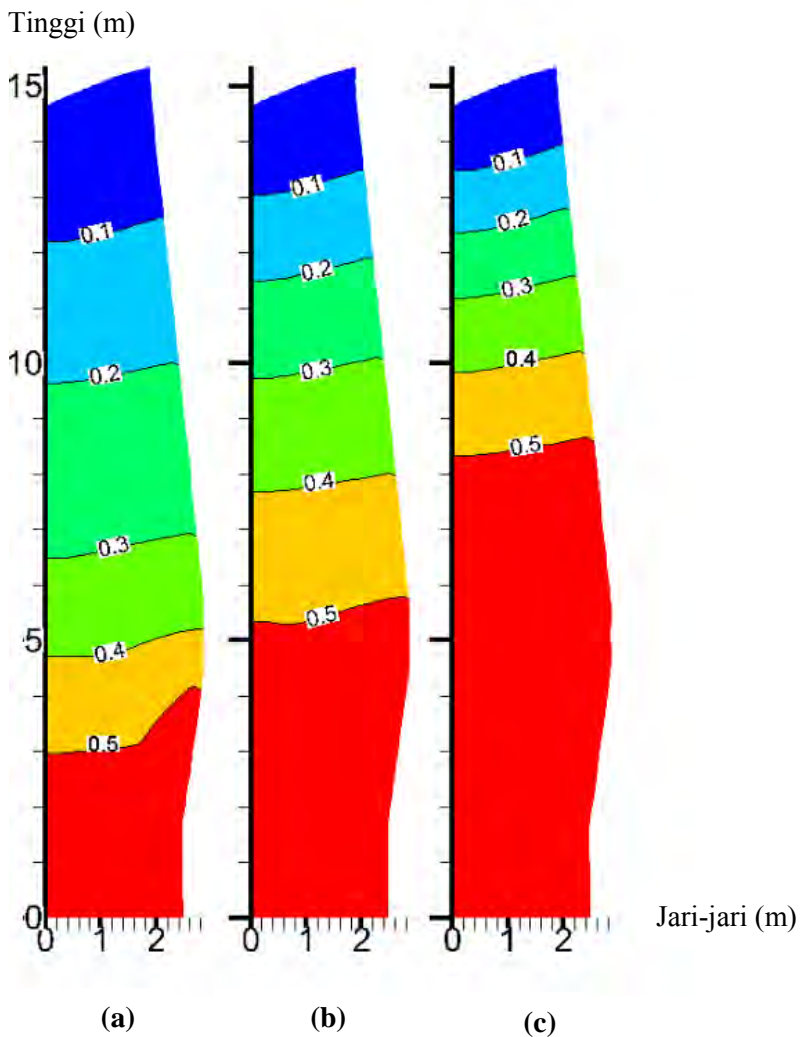


4.2.2 Analisa Distribusi Tekanan

MBF merupakan sebuah *counter current reactor* dimana udara panas yang dihasilkan dari pembakaran batu bara oleh oksigen akan naik keatas sementara *material burden* akan turun ke bawah. Gas panas ini akan menuju ke MBF bagian atas dengan melewati lapisan batu bara yang *permeable*. Walaupun gas panas melewati lapisan *permeable*, gas panas tetap akan mengalami penurunan tekanan sehingga akan terbentuk distribusi tekanan yang berbeda-beda pada setiap level MBF (Bogdandy, 1971).

Pada termodinamika tekanan memiliki hubungan yang linier dengan temperatur. Semakin tinggi temperatur maka tekanan akan semakin tinggi pula. Sedangkan dengan volume, tekanan memiliki hubungan yang berbanding terbalik, semakin besar volume suatu benda maka tekanan yang dialami akan semakin turun. Pada MBF faktor temperatur lebih mempengaruhi distribusi tekanan yang terjadi di dalam MBF sedangkan faktor volume tidak mempengaruhi distribusi tekanan yang ada. Hal ini dikarenakan volume MBF tidak mengalami perubahan selama pemodelan berjalan (Gaskell, 1981).

Pada analisa temperatur dapat diketahui bahwa laju alir udara mempengaruhi profil temperatur MBF. Hal ini menunjukkan bahwa variasi laju alir udara juga akan mempengaruhi distribusi tekanan pada MBF. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh laju alir udara terhadap distribusi tekanan dilakukan perhitungan dengan pemodelan. Proses pemodelan dilakukan dengan menggunakan parameter operasi yang sama untuk variasi besar laju alir udara yang diinjeksikan ke dalam MBF yaitu dengan variasi 10,36 kg/s, 14,81 kg/s dan 19,25 kg/s. Berikut ini profil distribusi tekanan dari hasil perhitungan dengan pemodelan.



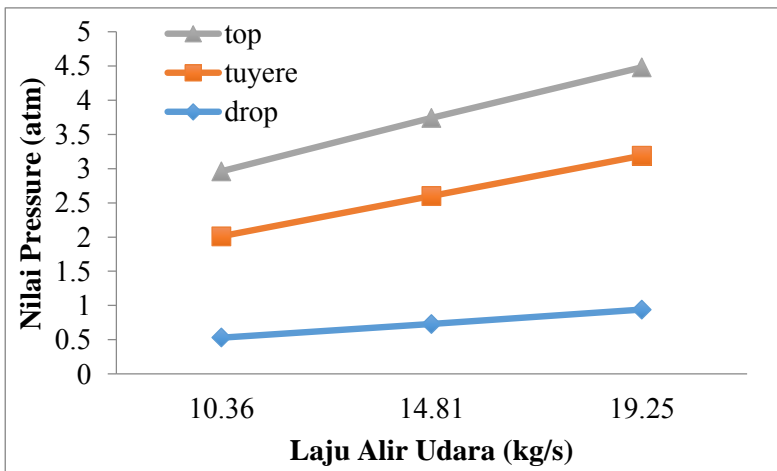
Gambar 4.6 Perbandingan distribusi tekanan dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,361, (b) 14,819 dan (c) 19,252



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Hasil distribusi tekanan karena faktor variasi laju alir udara bisa dilihat pada Gambar 4.6. Pada gambar ini dapat diketahui bahwa semakin besar laju alir udara maka akan menaikkan luasan area tekanan dengan range 0.5 atm. Pada laju alir udara 19,25 kg/s terlihat jelas area luasan distribusi tekanan dengan range 0.5 atm memiliki luasan paling besar dibandingkan dengan laju alir udara 10,36 kg/s dan laju alir udara 14,81 kg/s. Dengan demikian hal ini sesuai dengan hukum termodinamika bahwa dengan kenaikan temperatur pada MBF akan menaikkan tekanan pada MBF (Anni, 2016).

Dengan perhitungan secara pemodelan ini juga dapat diketahui *pressure drop* yang dihitung dari tekanan tuyer dikurangi dengan tekanan *top gas* pada MBF. Berikut ini diagram *pressure drop* dengan menggunakan perhitungan secara pemodelan.



Gambar 4.7 Grafik peningkatan *pressure drop mini blast furnace*

Dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa *pressure drop* akan semakin besar seiring dengan peningkatan laju alir udara. Hal ini karena dengan peningkatan jumlah laju alir udara otomatis akan



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

meningkatkan kecepatan *blast*, kecepatan *blast* ini akan membuat ukuran partikel *burden material* mengecil karena densitas *burden material* akan menurun seiring dengan peningkatan *blast velocity* sehingga *voidage* atau kekosongan menurun. Menurut Thibaut (1958), jumlah *voidage* akan mempengaruhi permeabilitas *burden material*. Ketika *voidage* menurun maka hambatan gas untuk naik akan meningkat sehingga gas akan banyak kehilangan energi kinetik. Kehilangan energi ini yang menyebabkan *pressure drop*. *Pressure drop* yang terlalu besar akan menyebabkan *hanging*, *slips* dan *flooding* pada MBF sehingga akan membuat operasi MBF memburuk.

Saat terjadi *hanging* dan *slips* struktur layer akan kacau sehingga aliran gas akan terganggu. Hal ini akan menyebabkan *ore* tidak akan tereduksi dengan baik dan *ore* akan masuk dalam *cohesive zone* dalam waktu yang lama sehingga akan menurunkan produktifitas di dalam MBF. *Hanging* dan *slips* ini hanya bisa ditangani dengan menyusun ulang struktur layer di MBF, yang berarti seluruh *burden material* harus di *refresh* (Geerdes, 2009).

Nilai maksimum dari *pressure drop* yang diijinkan tergantung pada *burden material* dan juga nilai spesifik dari MBF. Sebuah *blast furnace* dengan diameter hearth 14 meter dapat beroperasi dengan nilai maksimum *pressure drop* sebesar 1.95 bar (Geerdes, 2009).

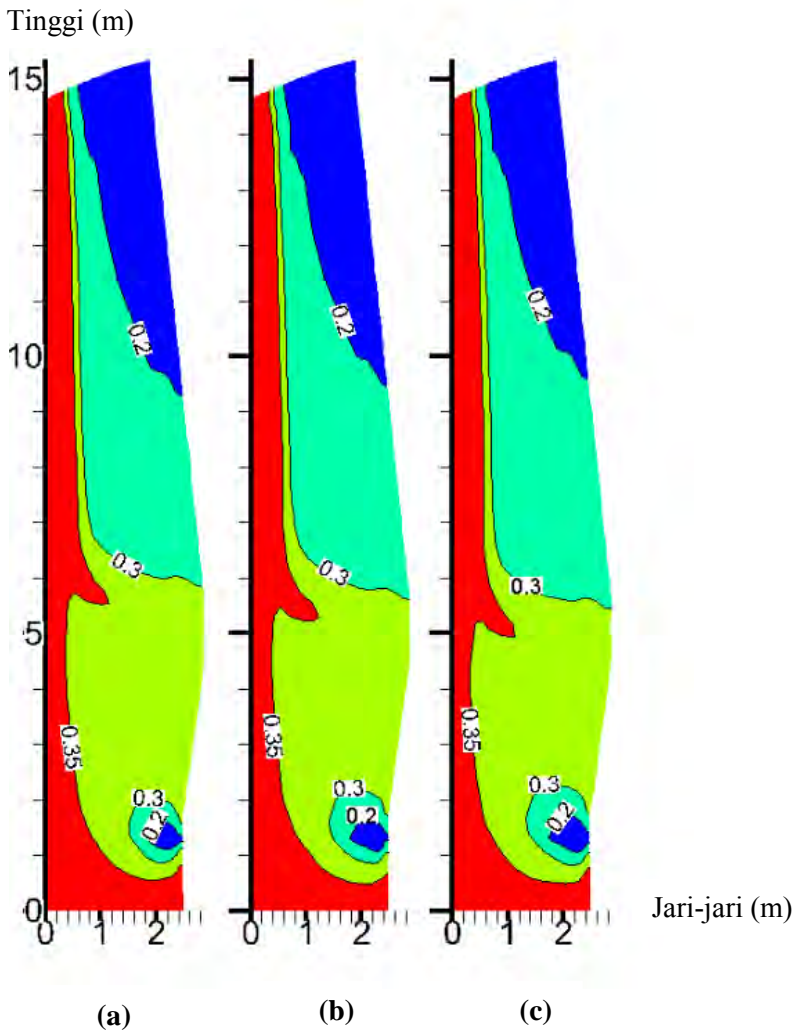
4.3 Analisa Distribusi Gas Karbon Monoksida dan Karbon Dioksida

Dalam pembahasan sebelumnya laju alir udara yang diinjeksikan dapat mempengaruhi distribusi temperatur dan distribusi tekanan pada MBF. Dengan parameter operasi yang sama pada penelitian ini akan dikaji pula fenomena distribusi gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida. Fenomena ini sangat penting karena gas karbon monoksida dapat mereduksi secara tidak langsung hematit sehingga tidak langsung jumlah gas karbon monoksida sangat berperan dalam menentukan keberhasilan produksi besi kasar. Gas karbon monoksida terbentuk dari reaksi pembakaran karbon sehingga jumlah laju alir udara yang

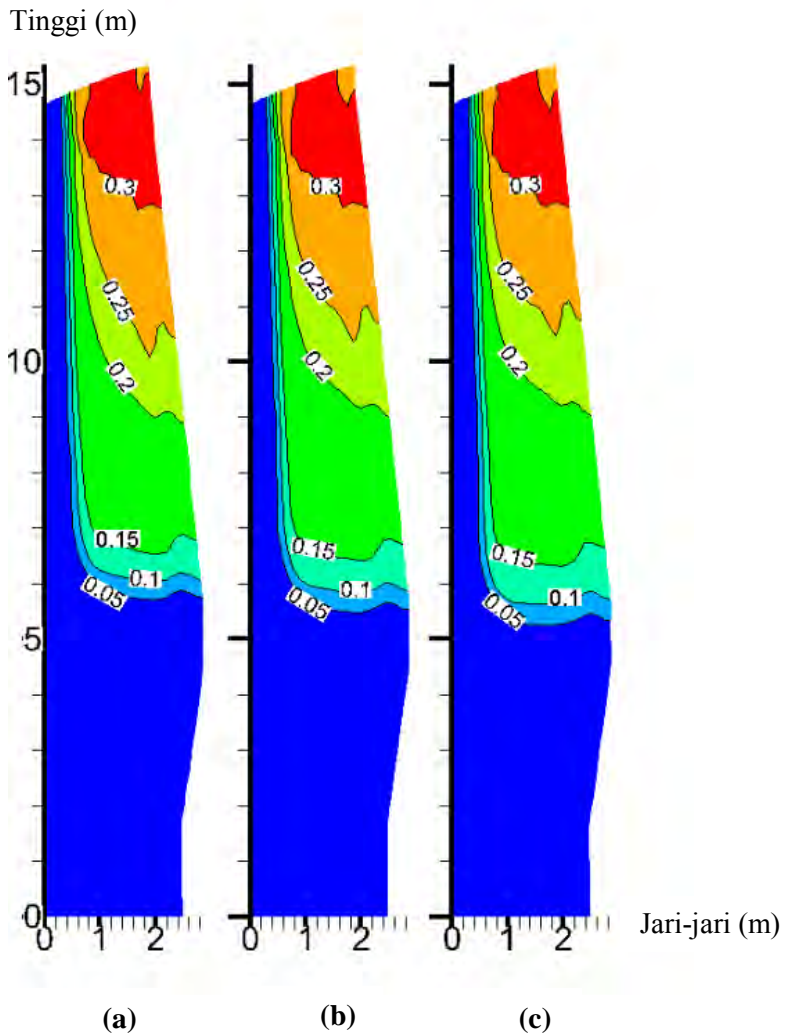


BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

diinjeksikan akan memberikan fenomena yang berbeda-beda (Gerstenberg, 1964). Untuk mengetahui pengaruh ukuran distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9



Gambar 4.8 Perbandingan distribusi fraksi CO dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25



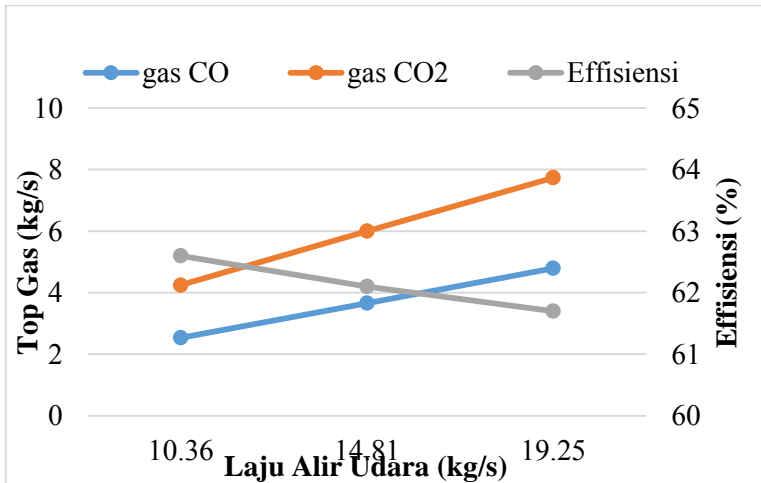
Gambar 4.9 Perbandingan distribusi fraksi CO_2 dengan variasi laju alir udara (kg/s) (a) 10,36, (b) 14,81 dan (c) 19,25



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa tidak terjadi perubahan terhadap profil fraksi volume karbon monoksida dan karbon dioksida pada MBF karena penambahan laju alir udara. Pada Gambar 4.8 gas karbon monoksida banyak terbentuk pada daerah bawah MBF, karena pada daerah ini banyak terdapat karbon statik yang bereaksi dengan oksigen hasil suplai dari *blower* sehingga menghasilkan karbon monoksida. Pada Gambar 4.9 terdapat gas karbon dioksida pada bagian bawah MBF, karena dalam daerah ini karbon dioksida dihasilkan dari reaksi *full combustion* yaitu reaksi pembakaran karbon dengan oksige (Anni, 2016).

Dengan menggunakan pemodelan ini tidak hanya dapat menggambarkan profil distribusi fraksi volume karbon monoksida dan karbon dioksida akan tetapi juga dapat menentukan jumlah karbon monoksida dan karbon dioksida yang dihasilkan dari pembakaran. Berikut ini grafik jumlah karbon monoksida, karbon dioksida dan efisiensi dari hasil perhitungan dengan pemodelan.



Gambar 4.10 Grafik jumlah CO atau CO₂ pada *top gas* dan penurunan efisiensi



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Dari Gambar 4.10 diatas dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan laju alir udara akan meningkatkan jumlah karbon monoksida dan karbon dioksida yang dihasilkan pada MBF. Hal ini karena jumlah oksigen yang bereaksi degan karbon semakin banyak sehingga jumlah karbon monoksida yang dihasilkan juga semakin banyak. Peningkatan jumlah karbon monoksida akan diiringi dengan peningkatan jumlah karbon monoksida karena karbon monoksida akan bereaksi dengan hematit, magnetit dan wustite dengan menghasilkan karbon dioksida. Sehingga semakin banyak jumlah karbon monoksida yang bereaksi maka semakin banyak pula karbon dioksida yang dihasilkan. Peningkatan jumlah gas karbonmonoksida dan gas karbondioksida ini akan membuat produktifitas meningkat karena proses reduksi akan berjalan lebih cepat (Schulz, 1972).

Dari mengetahui jumlah karbon monoksida dan karbon dioksida yang dihasilkan maka dapat diketahui efisiensi dari MBF dengan menggunakan rumus $\text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$. Setelah dilakukan perhitungan maka dapat diketahui efisiensi MBF yang ditunjukkan di Gambar 4.10.

Dari Gambar 4.10, nilai efisiensi dari *mini blast furnace* tidak berubah signifikan seiring dengan penambahan laju alir udara. Nilai efisiensi dari MBF akan terus menurun seiring dengan penambahan laju alir udara. Hal ini terjadi karena kecepatan blast yang meningkat akan menurunkan waktu kontak antara gas dan burden material, sehingga pada *indirect reduction* masih ada CO yang belum sempat bereaksi dengan wustite, magnetit dan hematit untuk membentuk gas CO_2 , sehingga rasio CO/CO_2 pada *top gas* akan meningkat. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi MBF terus menurun (Biswas, 1981).



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

NOMENKLATUR

A_i :	Permukaan dari material solid	[m ²]
A_{i-j} :	Kontak area antara fase i dan j	[m ²]
a_j :	Koeffisien Persamaan C_p	[J/kg.K]
b_j :	Koeffisien Persamaan C_p	[J/kg.K ²]
$C_{d_{i-j}}$:	Koeffisien Drag antara fase i dan j	[-]
$C_{P,j}$:	<i>Specific heat</i>	[J/kg.K]
c_j :	Koeffisien Persamaan C_p	
D^* :	Diameter Hidrolik	[m]
d_i :	diameter for fase i	[m]
\dot{E}_{i-j} :	Perpindahan Panas Konveksi antara fase i dan j	[W/m ³]
e_i :	Emisifitas fase i	[-]
\vec{F}_i^j :	Tranfer momentum antara fase i dan j	[N/m ³]
f_m :	Fraksi Volume komponen m pada fase solid	[-]
Fr_{i-j} :	<i>Froude number</i> untuk fase i dan j	[-]
\vec{g} :	Vektor gravitasi	[m/s ²]
H_i :	Entalpi	[J/kg]
$\Delta H_{i,j}^T$:	Panas Pembentukan dari spesies j fase i pada temperatur T	[J/kg]
h_{i-j} :	Koeffisien konveksi antara fase i dan j	[W/m ² .K]
k_{Boltzman} :	Konstanta Boltzman	[J/K]
k_i :	Konduktivitas termal fase i	[W/m.K]

M_j :	Berat molecular spesies j	[kg/kmol]
P_i :	Tekanan fase i	[Pa]
Pe_{i-j} :	Peclet number untuk fase i dan j	[-]
Pr_{i-j} :	Prandtl number untuk fase i dan j	[-]
R :	Konstanta Gas	[J/kmol.K]
R_n :	Laju Reaksi n	[kmol/m ³ s]
Re_{i-j} :	Reynolds number untuk fase i dan j	[-]
Sc_i :	Schmidt number untuk fase i	[-]
S_ϕ :	Source term in Eq. (2.1)	
T_i :	Temperatur untuk fase i	[K]
\vec{U}_i :	Vektor kecepatan untuk fase i	[m/s]
W_{i-j} :	Weber number untuk fase i dan j	[-]
w :	Parameter Stokimetri Wustite	[-]
$y_{i,j}$:	Fraksi mol untuk fase i dan j	[-]

Simbol

Γ_ϕ :	Koeffisien Transfer persamaan 1	
ε_i :	Fraksi Volume fase i	[-]
\in_j :	Karakteristik Energi pada spesies j	[J]
θ :	Sudut Inclination layer	[radians]
θ_{i-j} :	Sudut Kontak antara fase i dan j	[radians]
ρ_i :	Berat Jenis fase i	[kg/m ³]
ϕ_i :	Variabel bebas persamaan 1	
φ_i :	Faktor Bentuk fase i	[-]

HASIL PERHITUNGAN PROGRAM

A. Perhitungan *mass balance* laju alir udara 10,36 kg/s

| BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K

Hot metal (calculated) 1815.68C 2088.83K
Hot slag (calculated) 1814.70C 2087.85K
Top gas (calculated) 142.34C 415.49K
Top PC char (calculated) 159.09C 432.24K
Top FO/flux (calculated) 159.09C 432.24K

Rwy max. gas (calculated) 1861.46C 2134.61K
Rwy max. solid (calculated) 1913.40C 2186.55K
Ex-rwy gas (calculated) 1762.27C 2035.42K
```

Miscellaneous

```
=====
Top gas pressure 0.951 atm (specified)
Tuyere pressure 1.481 atm (calculated)
Pressure drop 0.530 atm (calculated)
Blast velocity 1079.5 m/s
Burden velocity 1.07 mm/s
Coke rate 525.5 kg/thm
PC rate 78.3 kg/thm
NG rate 0.0 kg/thm
Fuel rate 603.8 kg/thm
ENRICHMENT = -0.996080679235739
```

summed reaction rates (kg/s)

```
=====
CO g In : 0.00 Out : 2.53 Error: -0.05 Error/(In+Gen.): -0.72%
      ICHO : -0.39 ICMO : -0.60 ICWO : -1.86 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
      ICWX : 0.00 IO1C : 3.30 IO1F : 0.34 IOCO : 0.00 ISLC : 1.94
      ISLF : 0.00 IWGC : 0.30 IWGF : 0.00 IDR : 0.10 IWS : -0.77
      IVS : 0.04 IQC : 0.11 IQM : -0.06 ICS : -0.05 IQSR : 0.05
      ISI : 0.04 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
CO2 g In : 0.00 Out : 4.25 Error: 0.05 Error/(In+Gen.): 0.84%
      ICHO : 0.61 ICMO : 0.94 ICWO : 2.93 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
      ICWX : 0.00 IO2C : 0.04 IO2F : 0.00 IOCO : 0.00 ISLC : -1.52
      ISLF : 0.00 IWS : 1.21 ICV : 0.11 IVS : -0.02 IC1C : 0.00
      IC2C : 0.00 IC3C : 0.00 IC4C : 0.00
H2 g In : 0.00 Out : 0.01 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.27%
      IHHO : 0.00 IHMO : 0.00 IHWO : -0.07 IHXX : 0.00 IHMX : 0.00
      IHWX : 0.00 IOH2 : 0.00 IWGC : 0.02 IWGF : 0.00 IWS : 0.06
      IVS : 0.00 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
H2O g In : 0.00 Out : 0.80 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.09%
      IHHO : 0.00 IHMO : 0.04 IHWO : 0.60 IHXX : 0.00 IHMX : 0.00
      IHWX : 0.00 IEVO : 0.48 IEVC : 0.24 IOH2 : 0.00 IWGC : -0.20
      IWGF : 0.00 IWS : -0.49 ICV : 0.13
O2 g In : 2.30 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.09%
      IO1C : -1.88 IO2C : -0.03 IO1F : -0.20 IO2F : 0.00 IOCO : 0.00
      IOH2 : 0.00 ICV : -0.19 IC10 : 0.00 IC20 : 0.00 IC30 : 0.00
      IC40 : 0.00
N2 g In : 8.06 Out : 7.80 Error: 0.27 Error/(In+Gen.): 3.34%
      ICV : 0.01 IVS : 0.00
SiO g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.59%
      IQM : -0.09 ICS : 0.09 IQSR : 0.07 ISI : -0.07
CH4 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC10 : 0.00 IC1C : 0.00
C2H6 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
C3H8 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00
C4H10g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
```


C	c	In	:	2.41	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.12%
		ICD	:	-0.37	IO1C	:	-1.41	IO2C	:	-0.01	ISLC : -0.42 IWGC : -0.13
		IDR	:	-0.04	IQC	:	-0.07	IQM	:	0.02	ICS : 0.05 IQSR : -0.02
SiC	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.68%
		IQC	:	0.08	ICS	:	-0.08				
Fe2O3o		In	:	6.56	Out	:	0.00	Error:	-0.09	Error/(In+Gen.):	-1.45%
		ICHO	:	-6.66	IHHO	:	0.00				
Fe3O4o		In	:	0.21	Out	:	0.00	Error:	0.09	Error/(In+Gen.):	1.36%
		ICHO	:	6.43	ICMO	:	-5.89	IHHO	:	0.00	IHMO : -0.66
FexO	o	In	:	1.03	Out	:	0.00	Error:	0.06	Error/(In+Gen.):	0.90%
		ICMO	:	5.55	ICWO	:	-4.59	IHHO	:	0.62	IHW : -2.29 IMWO : -0.26
Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-0.45%
		ICWO	:	3.53	IHW	:	1.76	IMIO	:	-5.31	
H2O	o	In	:	0.48	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.02%
		IEVO	:	-0.48							
slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00							
SiO2	o	In	:	1.02	Out	:	0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.66%
		IMSO	:	-1.02							
H2O	c	In	:	0.24	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.03%
		IEVC	:	-0.24							
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC	:	0.00							
SiO2	c	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-2.16%
		IMSC	:	-0.04	IQC	:	-0.12	IQM	:	0.12	
Al2O3o		In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.49%
		IMAO	:	-0.04							
MgO	o	In	:	0.28	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.03%
		IMMO	:	-0.28							
CaO	o	In	:	1.24	Out	:	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.80%
		IMCO	:	-1.25							
Al2O3c		In	:	0.39	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.33%
		IMAC	:	-0.39							
MgO	c	In	:	0.01	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.85%
		IMMC	:	-0.01							
CaO	c	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.64%
		IMCC	:	-0.03							
Fe	l	In	:	0.00	Out	:	5.51	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-0.35%
		IMIO	:	5.31	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.19	
C	l	In	:	0.00	Out	:	0.36	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.66%
		ICD	:	0.37	ISI	:	-0.02				
Si	l	In	:	0.00	Out	:	0.04	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-2.33%
		ISI	:	0.04							
C	f	In	:	0.34	Out	:	0.19	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.15%
		IO1F	:	-0.15	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWGF : 0.00
Volats		In	:	0.08	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.12%
		ICV	:	-0.06	IVS	:	-0.02				
Ash	f	In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	100.00%
		IMGF	:	0.00							
SiO2	f	In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.79%
		IMSF	:	-0.02							
Al2O3f		In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.80%
		IMAF	:	-0.01							
MgO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.82%
		IMMF	:	0.00							
CaO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.82%
		IMCF	:	0.00							
Fe2O3x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHM : 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHM	:	0.00	IHW : 0.00 IMWX : 0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICWX	:	0.00	IHWX	:	0.00	IMX	:	0.00	
slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FexO	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	5.58%
		IMWO	:	0.26	IMWX	:	0.00	IDR	:	-0.24	
slag	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00	

SiO2 l	In	:	0.00	Out	:	0.97	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.46%
	IMSO	:	1.02	IMSC	:	0.04	IMSF	:	0.02	IQSR	:	-0.10
Al2O3 l	In	:	0.00	Out	:	0.44	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	-0.75%
	IMAO	:	0.04	IMAC	:	0.39	IMAF	:	0.01		:	
MgO l	In	:	0.00	Out	:	0.30	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	-0.69%
	IMMO	:	0.28	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00		:	
CaO l	In	:	0.00	Out	:	1.29	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.)	:	-0.61%
	IMCO	:	1.25	IMCC	:	0.03	IMCF	:	0.00		:	
Fe2O3 x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00		:			:	
Fe3O4 x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx	:	0.00
FeO x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
	ICMX	:	0.00	ICWx	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx	:	0.00 IMWx : 0.00
Fe x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
	ICWx	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00		:	
Slag x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
SiO2 x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
Al2O3 x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
MgO x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%
CaO x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.)	:	0.00%

Stream Analyses	Mass Rate (kg/s)	Mass Frac. (%)	Mole Rate (kmol/s)	Mole Frac. (%)	Rate (kg/thm)
Ore (in)	10.857	100.000	0.130	100.000	1835.344
Fe2O3o	6.562	60.440	0.041	31.617	1109.282
Fe3O4o	0.207	1.910	0.001	0.689	35.055
FeO o	1.029	9.480	0.015	11.468	173.991
H2O o	0.480	4.420	0.027	20.496	81.122
SiO2 o	1.023	9.420	0.017	13.097	172.889
Al2O3o	0.035	0.327	0.000	0.268	5.997
MgO o	0.280	2.581	0.007	5.349	47.367
CaO o	1.240	11.422	0.022	17.016	209.641
----- (kg/thm) -----					
Coke (in)	3.109	100.000	0.219	100.000	525.511
C c	2.408	77.450	0.200	91.559	407.008
H2O c	0.241	7.750	0.013	6.108	40.727
SiO2 c	0.033	1.050	0.001	0.248	5.518
Al2O3c	0.390	12.533	0.004	1.745	65.860
MgO c	0.010	0.322	0.000	0.114	1.694
CaO c	0.028	0.895	0.000	0.227	4.704
----- (kg/thm) -----					
All solid (in)	13.966	100.000	0.349	100.000	2360.855
C c	2.408	17.240	0.200	57.456	407.008
Fe2O3o	6.562	46.986	0.041	11.776	1109.282
Fe3O4o	0.207	1.485	0.001	0.257	35.055
FeO o	1.029	7.370	0.015	4.272	173.991
H2O o	0.480	3.436	0.027	7.634	81.122
SiO2 o	1.023	7.323	0.017	4.878	172.889
H2O c	0.241	1.725	0.013	3.833	40.727
SiO2 c	0.033	0.234	0.001	0.156	5.518
Al2O3o	0.035	0.254	0.000	0.100	5.997
MgO o	0.280	2.006	0.007	1.992	47.367
CaO o	1.240	8.880	0.022	6.338	209.641
Al2O3c	0.390	2.790	0.004	1.095	65.860
MgO c	0.010	0.072	0.000	0.071	1.694
CaO c	0.028	0.199	0.000	0.142	4.704
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
----- (Nm3/thm) -----					
Blast (in)	10.361	100.000	0.360	100.000	1362.279
H2O g	0.001	0.006	0.000	0.010	0.132
O2 g	2.302	22.215	0.072	20.004	272.509
N2 g	8.058	77.779	0.288	79.986	1089.638
----- (kg/thm) -----					
Fines (in)	0.482	100.000	0.053	100.000	81.558
C f	0.335	69.519	0.028	52.599	56.698
Volats	0.084	17.476	0.024	45.691	14.253
Ash f	0.019	3.979	0.000	0.561	3.245
SiO2 f	0.024	5.047	0.000	0.763	4.116
Al2O3f	0.018	3.633	0.000	0.324	2.963
MgO f	0.000	0.092	0.000	0.021	0.075
CaO f	0.001	0.254	0.000	0.041	0.207

Top Gas (out)	15.398	100.000	0.515	100.000	1952.123
CO g	2.534	16.459	0.090	17.560	342.798
CO2 g	4.249	27.597	0.097	18.740	365.819
H2 g	0.011	0.069	0.005	1.018	19.867
H2O g	0.805	5.225	0.045	8.668	169.211
O2 g	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2 g	7.796	50.631	0.278	54.001	1054.175
SiO g	0.003	0.019	0.000	0.013	0.252
----- (kg/thm) -----					
Fines (out)	0.197	100.000	0.016	100.000	33.290
C f	0.190	96.506	0.016	99.395	32.127
SiO2 f	0.004	1.954	0.000	0.402	0.650
Al2O3f	0.003	1.406	0.000	0.171	0.468
MgO f	0.000	0.035	0.000	0.011	0.012
CaO f	0.000	0.098	0.000	0.022	0.033
----- (kg/thm) -----					
Hot Metal (out)	5.916	100.000	0.130	100.000	1000.000
Fe l	5.514	93.210	0.099	75.924	932.096
C l	0.357	6.032	0.030	22.848	60.317
Si l	0.045	0.759	0.002	1.229	7.587
----- (kg/thm) -----					
Hot Slag (out)	3.000	100.000	0.051	100.000	507.098
FexO l	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
SiO2 l	0.973	32.427	0.016	31.848	164.434
Al2O3l	0.445	14.818	0.004	8.577	75.139
MgO l	0.296	9.853	0.007	14.426	49.964
CaO l	1.287	42.903	0.023	45.150	217.558

Liquid Mass Rates			
=====	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	5.916	511.1	1.8138
Slag	3.000	259.2	0.9197
Total	8.916	770.3	2.7335

Global Elemental Balance (kg/s)

Component	Inflow				Outflow			
	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	5.531	0.000	5.531	0.000	5.514	0.000	5.514
C	0.000	2.408	0.376	2.783	2.246	0.357	0.190	2.793
O	2.302	4.147	0.039	6.489	5.253	1.212	0.003	6.468
H	0.000	0.081	0.019	0.100	0.101	0.000	0.000	0.101
N	8.058	0.000	0.007	8.066	7.796	0.000	0.000	7.796
Si	0.000	0.493	0.011	0.505	0.002	0.500	0.002	0.503
Al	0.000	0.225	0.009	0.234	0.000	0.235	0.001	0.237
Ca	0.000	0.906	0.001	0.907	0.000	0.920	0.000	0.920
Mg	0.000	0.175	0.000	0.175	0.000	0.178	0.000	0.178
Total	10.361	13.966	0.482	24.809	15.398	8.916	0.197	24.510

Global Enthalpy Balance (MW)

Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	12.36	-0.01	12.35	1.91	-58.80	-56.89
Solid	0.00	-87.84	-87.84	-1.13		-1.13
Liquid				7.21	1.70	8.91
Slag				6.50	-30.91	-24.40
Fines	0.78	-3.59	-2.81	0.03	-0.25	-0.23
Solid to wall				-0.12		-0.12
Gas to wall				-0.13		-0.13

Sum totals	13.14	-91.44	-78.29	14.26	-88.26	-73.99
Error (In-out)	-4.30					

B. Perhitungan *mass balance* laju alir udara 14,81 kg/s

| BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K

Hot metal (calculated) 1824.41C 2097.56K
Hot slag (calculated) 1823.85C 2097.00K
Top gas (calculated) 150.09C 423.24K
Top PC char (calculated) 192.78C 465.93K
Top FO/flux (calculated) 192.78C 465.93K

Rwy max. gas (calculated) 1887.48C 2160.63K
Rwy max. solid (calculated) 1915.76C 2188.91K
Ex-rwy gas (calculated) 1795.57C 2068.72K
```

Miscellaneous

```
=====
Top gas pressure 1.137 atm (specified)
Tuyere pressure 1.871 atm (calculated)
Pressure drop 0.734 atm (calculated)
Blast velocity 1221.9 m/s
Burden velocity 1.52 mm/s
Coke rate 517.1 kg/thm
PC rate 77.0 kg/thm
NG rate 0.0 kg/thm
Fuel rate 594.1 kg/thm
ENRICHMENT = -1.01357491715888
```

summed reaction rates (kg/s)

```
=====
CO g In : 0.00 Out : 3.66 Error: -0.01 Error/(In+Gen.): -0.15%
      ICHO : -0.55 ICMO : -0.85 ICWO : -2.61 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
      ICWX : 0.00 IO1C : 4.74 IO1F : 0.53 IOCO : 0.00 ISLC : 2.74
      ISLF : 0.00 IWGC : 0.42 IWGF : 0.00 IDR : 0.18 IWS : -1.11
      IVS : 0.05 IQC : 0.15 IQM : -0.09 ICS : -0.07 IQSR : 0.07
      ISI : 0.05 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
CO2 g In : 0.00 Out : 6.00 Error: 0.07 Error/(In+Gen.): 0.83%
      ICHO : 0.87 ICMO : 1.33 ICWO : 4.10 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
      ICWX : 0.00 IO2C : 0.06 IO2F : 0.01 IOCO : 0.00 ISLC : -2.16
      ISLF : 0.00 IWS : 1.74 ICV : 0.16 IVS : -0.03 IC1C : 0.00
      IC2C : 0.00 IC3C : 0.00 IC4C : 0.00
H2 g In : 0.00 Out : 0.02 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.09%
      IHHO : 0.00 IHMO : -0.01 IHWO : -0.09 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
      IHWX : 0.00 IOH2 : 0.00 IWGC : 0.03 IWGF : 0.00 IWS : 0.08
      IVS : 0.01 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
H2O g In : 0.01 Out : 1.14 Error: -0.01 Error/(In+Gen.): -0.24%
      IHHO : 0.00 IHMO : 0.06 IHWO : 0.84 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
      IHWX : 0.00 IEVO : 0.68 IEVC : 0.34 IOH2 : 0.00 IWGC : -0.27
      IWGF : 0.00 IWS : -0.71 ICV : 0.19
O2 g In : 3.29 Out : 0.00 Error: -0.03 Error/(In+Gen.): -0.85%
      IO1C : -2.71 IO2C : -0.04 IO1F : -0.30 IO2F : -0.01 IOCO : 0.00
      IOH2 : 0.00 ICV : -0.26 IC10 : 0.00 IC20 : 0.00 IC30 : 0.00
      IC40 : 0.00
N2 g In : 11.51 Out : 11.10 Error: 0.43 Error/(In+Gen.): 3.71%
      ICV : 0.01 IVS : 0.00
SiO g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.79%
      IQM : -0.14 ICS : 0.12 IQSR : 0.10 ISI : -0.08
CH4 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC10 : 0.00 IC1C : 0.00
C2H6 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
C3H8 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC30 : 0.00 IC3C : 0.00
C4H10g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
      IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
C c In : 3.41 Out : 0.00 Error: -0.02 Error/(In+Gen.): -0.61%
      ICD : -0.52 IO1C : -2.03 IO2C : -0.02 ISLC : -0.59 IWGC : -0.18
      IDR : -0.08 IQC : -0.09 IQM : 0.04 ICS : 0.06 IQSR : -0.03
```

SiC	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.12%
		IQC	:	0.10	ICS	:	-0.11					
Fe203o		In	:	9.30	Out	:	0.00	Error	:	-0.15	Error/(In+Gen.):	-1.60%
		ICHO	:	-9.45	IHHO	:	0.00					
Fe304o		In	:	0.29	Out	:	0.00	Error	:	0.16	Error/(In+Gen.):	1.74%
		ICHO	:	9.14	ICMO	:	-8.31	IHHO	:	0.00	IHMO	: -0.95
FeXo	o	In	:	1.46	Out	:	0.00	Error	:	0.06	Error/(In+Gen.):	0.61%
		ICMO	:	7.83	ICWO	:	-6.43	IHMO	:	0.90	IHW	: -3.22 IMWO : -0.48
Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	-0.03	Error/(In+Gen.):	-0.45%
		ICWO	:	4.94	IHW	:	2.47	IMIO	:	-7.45		
H2o	o	In	:	0.68	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.02%
		IEVO	:	-0.68								
Slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00								
SiO2	o	In	:	1.45	Out	:	0.00	Error	:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.56%
		IMSO	:	-1.44								
H2o	c	In	:	0.34	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.05%
		IEVC	:	-0.34								
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC	:	0.00								
SiO2	c	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-2.34%
		IMSC	:	-0.08	IQC	:	-0.16	IQM	:	0.19		
Al2O3o		In	:	0.05	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.75%
		IMAO	:	-0.05								
MgO	o	In	:	0.40	Out	:	0.00	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-1.28%
		IMMO	:	-0.40								
CaO	o	In	:	1.76	Out	:	0.00	Error	:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-1.05%
		IMCO	:	-1.78								
Al2O3c		In	:	0.55	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.57%
		IMAC	:	-0.56								
MgO	c	In	:	0.01	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.07%
		IMMC	:	-0.01								
CaO	c	In	:	0.04	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.86%
		IMCC	:	-0.04								
Fe	l	In	:	0.00	Out	:	7.96	Error	:	-0.17	Error/(In+Gen.):	-2.20%
		IMIO	:	7.45	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.34		
C	l	In	:	0.00	Out	:	0.51	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-2.41%
		ICD	:	0.52	ISI	:	-0.02					
Si	l	In	:	0.00	Out	:	0.05	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-7.28%
		ISI	:	0.05								
C	f	In	:	0.48	Out	:	0.24	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.85%
		IOIF	:	-0.23	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWGF	: 0.00
Volats		In	:	0.12	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.37%
		ICV	:	-0.09	IVS	:	-0.03					
Ash	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error	:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
		IMGF	:	0.00								
SiO2	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMSF	:	-0.03								
Al2O3f		In	:	0.02	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMAF	:	-0.02								
MqO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMMF	:	0.00								
CaO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMCF	:	0.00								
Fe2O3x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00					
Fe3O4x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx	: 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx	: 0.00 IMWx : 0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICWX	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00		
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x		In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FeXo	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.04	Error/(In+Gen.):	7.62%
		IMWO	:	0.48	IMWx	:	0.00	IDR	:	-0.44		
Slag	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00		
SiO2	l	In	:	0.00	Out	:	1.46	Error	:	-0.04	Error/(In+Gen.):	-2.79%
		IMSO	:	1.44	IMSC	:	0.08	IMSF	:	0.03	IQSR	: -0.14

Al2O3	In	:	0.00	Out	:	0.65	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-3.21%
	IMAO	:	0.05	IMAC	:	0.56	IMAF	:	0.02	
MgO	l	In	:	0.00	Out	:	0.44	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):
	IMMO	:	0.40	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00	
CaO	l	In	:	0.00	Out	:	1.89	Error:	-0.07	Error/(In+Gen.):
	IMCO	:	1.78	IMCC	:	0.04	IMCF	:	0.00	
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx : 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
	ICMX	:	0.00	ICWx	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx : 0.00 IMWx : 0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
	ICWx	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):

Stream Analyses	Mass Rate (kg/s)	Mass Frac. (%)	Mole Rate (kmol/s)	Mole Frac. (%)	Rate (kg/thm)
Ore (in)	15.393	100.000	0.184	100.000	1805.795
Fe2O3 o	9.304	60.440	0.058	31.617	1091.423
Fe3O4 o	0.294	1.910	0.001	0.689	34.491
FeO o	1.459	9.480	0.021	11.468	171.189
H2O o	0.680	4.420	0.038	20.496	79.816
SiO2 o	1.450	9.420	0.024	13.097	170.106
Al2O3 o	0.050	0.327	0.000	0.268	5.900
MgO o	0.397	2.581	0.010	5.349	46.605
CaO o	1.758	11.422	0.031	17.016	206.266
----- (kg/thm) -----					
Coke (in)	4.408	100.000	0.310	100.000	517.059
C c	3.414	77.450	0.284	91.559	400.462
H2O c	0.342	7.750	0.019	6.108	40.072
SiO2 c	0.046	1.050	0.001	0.248	5.429
Al2O3 c	0.552	12.533	0.005	1.745	64.801
MgO c	0.014	0.322	0.000	0.114	1.666
CaO c	0.039	0.895	0.001	0.227	4.629
----- (kg/thm) -----					
All solid (in)	19.801	100.000	0.495	100.000	2322.854
C c	3.414	17.240	0.284	57.457	400.462
Fe2O3 o	9.304	46.986	0.058	11.776	1091.423
Fe3O4 o	0.294	1.485	0.001	0.257	34.491
FeO o	1.459	7.370	0.021	4.272	171.189
H2O o	0.680	3.436	0.038	7.634	79.816
SiO2 o	1.450	7.323	0.024	4.878	170.106
H2O c	0.342	1.725	0.019	3.833	40.072
SiO2 c	0.046	0.234	0.001	0.156	5.429
Al2O3 o	0.050	0.254	0.000	0.100	5.900
MgO o	0.397	2.006	0.010	1.992	46.605
CaO o	1.758	8.880	0.031	6.338	206.266
Al2O3 c	0.552	2.790	0.005	1.095	64.801
MgO c	0.014	0.072	0.000	0.071	1.666
CaO c	0.039	0.199	0.001	0.142	4.629
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
----- (Nm3/thm) -----					
Blast (in)	14.809	100.000	0.514	100.000	1351.738
H2O g	0.009	0.061	0.000	0.097	1.313
O2 g	3.288	22.203	0.103	19.986	270.164
N2 g	11.512	77.737	0.411	79.916	1080.260
----- (kg/thm) -----					
Fines (in)	0.684	100.000	0.075	100.000	80.234
C f	0.475	69.519	0.040	52.599	55.778
Volats	0.120	17.476	0.034	45.691	14.022
Ash f	0.027	3.979	0.000	0.561	3.192
SiO2 f	0.035	5.047	0.001	0.763	4.050
Al2O3 f	0.025	3.633	0.000	0.324	2.915
MgO f	0.001	0.092	0.000	0.021	0.073
CaO f	0.002	0.254	0.000	0.041	0.204
----- (Nm3/thm) -----					
Top Gas (out)	21.917	100.000	0.734	100.000	1930.522
CO g	3.660	16.698	0.131	17.796	343.548
CO2 g	5.999	27.370	0.136	18.565	358.395

H2	g	0.015	0.071	0.008	1.045	20.179
H2O	g	1.145	5.222	0.064	8.653	167.041
O2	g	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2	g	11.095	50.622	0.396	53.930	1041.133
SiO	g	0.004	0.017	0.000	0.012	0.225
----- (kg/thm) -----						
Fines (out)		0.250	100.000	0.020	100.000	29.335
C	f	0.244	97.493	0.020	99.569	28.600
SiO2	f	0.004	1.402	0.000	0.286	0.411
Al2O3	f	0.003	1.009	0.000	0.121	0.296
MgO	f	0.000	0.025	0.000	0.008	0.007
CaO	f	0.000	0.071	0.000	0.015	0.021
----- (kg/thm) -----						
Hot Metal (out)		8.524	100.000	0.187	100.000	1000.000
Fe	l	7.956	93.329	0.142	76.100	933.287
C	l	0.514	6.028	0.043	22.856	60.277
Si	l	0.055	0.644	0.002	1.043	6.436
----- (kg/thm) -----						
Hot Slag (out)		4.432	100.000	0.075	100.000	519.875
FeO	l	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003
SiO2	l	1.457	32.878	0.024	32.277	170.927
Al2O3	l	0.648	14.628	0.006	8.463	76.049
MgO	l	0.435	9.823	0.011	14.375	51.065
CaO	l	1.891	42.670	0.034	44.885	221.831

Liquid Mass Rates			
	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	8.524	736.5	2.6136
Slag	4.432	382.9	1.3587
Total	12.956	1119.4	3.9723

Global Elemental Balance (kg/s)

Component	Inflow				Outflow			
	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	7.841	0.000	7.841	0.000	7.956	0.000	7.956
C	0.000	3.414	0.533	3.946	3.206	0.514	0.244	3.964
O	3.296	5.880	0.055	9.231	7.470	1.793	0.003	9.267
H	0.001	0.114	0.028	0.143	0.144	0.000	0.000	0.144
N	11.512	0.000	0.011	11.523	11.095	0.000	0.000	11.095
Si	0.000	0.699	0.016	0.716	0.002	0.736	0.002	0.740
Al	0.000	0.319	0.013	0.332	0.000	0.343	0.001	0.344
Ca	0.000	1.285	0.001	1.286	0.000	1.351	0.000	1.352
Mg	0.000	0.248	0.000	0.249	0.000	0.263	0.000	0.263
Total	14.809	19.801	0.684	35.294	21.917	12.956	0.250	35.124

Global Enthalpy Balance (MW)

Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	17.68	-0.12	17.56	2.90	-83.45	-80.55
Solid	0.00	-124.54	-124.53	-1.18		-1.18
Liquid				10.43	2.44	12.88
Slag				9.67	-45.84	-36.17
Fines	1.10	-5.09	-3.98	0.04	-0.30	-0.26
Solid to wall				-0.12		-0.12
Gas to wall				-0.12		-0.12
Sum totals	18.79	-129.75	-110.96	21.64	-127.15	-105.52
Error (In-Out)	-5.44					

C. Perhitungan *mass balance* laju alir udara 19,62 kg/s

| BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K

Hot metal (calculated) 1829.89C 2103.04K
Hot slag (calculated) 1829.41C 2102.56K
Top gas (calculated) 153.94C 427.09K
Top PC char (calculated) 223.75C 496.90K
Top FO/flux (calculated) 223.75C 496.90K

Rwy max. gas (calculated) 1890.83C 2163.98K
Rwy max. solid (calculated) 1924.30C 2197.45K
Ex-rwy gas (calculated) 1818.43C 2091.58K
```

Miscellaneous

```
=====
Top gas pressure 1.296 atm (specified)
Tuyere pressure 2.237 atm (calculated)
Pressure drop 0.940 atm (calculated)
Blast velocity 1329.0 m/s
Burden velocity 1.95 mm/s
Coke rate 523.5 kg/thm
PC rate 78.0 kg/thm
NG rate 0.0 kg/thm
Fuel rate 601.5 kg/thm
ENRICHMENT = -1.01357491715887
```

summed reaction rates (kg/s)

```
=====
CO g In : 0.00 Out : 4.79 Error: -0.10 Error/(In+Gen.): -0.88%
    ICHO : -0.69 ICMO : -1.09 ICWO : -3.36 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO1C : 5.99 IO1F : 0.74 IOCO : 0.00 ISLC : 3.54
    ISLF : 0.00 IWGC : 0.51 IWGF : 0.00 IDR : 0.29 IWS : -1.41
    IVS : 0.07 IQC : 0.16 IQM : -0.11 ICS : -0.08 IQSR : 0.08
    ISI : 0.05 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
CO2 g In : 0.00 Out : 7.74 Error: 0.02 Error/(In+Gen.): 0.19%
    ICHO : 1.08 ICMO : 1.72 ICWO : 5.28 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO2C : 0.07 IO2F : 0.01 IOCO : 0.00 ISLC : -2.78
    ISLF : 0.00 IWS : 2.22 ICV : 0.21 IVS : -0.04 IC1C : 0.00
    IC2C : 0.00 IC3C : 0.00 IC4C : 0.00
H2 g In : 0.00 Out : 0.02 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.01%
    IHHO : 0.00 IHMO : -0.01 IHWO : -0.12 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
    IHWX : 0.00 IOH2 : 0.00 IWGC : 0.04 IWGF : 0.00 IWS : 0.10
    IVS : 0.01 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
H2O g In : 0.01 Out : 1.47 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.08%
    IHHO : 0.00 IHMO : 0.08 IHWO : 1.05 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
    IHWX : 0.00 IEVO : 0.87 IEVC : 0.44 IOH2 : 0.00 IWGC : -0.33
    IWGF : 0.00 IWS : -0.91 ICV : 0.24
O2 g In : 4.27 Out : 0.00 Error: 0.03 Error/(In+Gen.): 0.66%
    IO1C : -3.42 IO2C : -0.05 IO1F : -0.42 IO2F : -0.01 IOCO : 0.00
    IOH2 : 0.00 ICV : -0.34 IC10 : 0.00 IC20 : 0.00 IC30 : 0.00
    IC40 : 0.00
N2 g In : 14.97 Out : 14.26 Error: 0.72 Error/(In+Gen.): 4.79%
    ICV : 0.01 IVS : 0.00
SiO g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -1.32%
    IQM : -0.17 ICS : 0.12 IQSR : 0.13 ISI : -0.08
CH4 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
    IC10 : 0.00 IC1C : 0.00
C2H6 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
    IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
C3H8 g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00
C4H10g In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
    IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
C c In : 4.39 Out : 0.00 Error: 0.01 Error/(In+Gen.): 0.24%
    ICD : -0.66 IO1C : -2.57 IO2C : -0.02 ISLC : -0.76 IWGC : -0.22
    IDR : -0.12 IQC : -0.10 IQM : 0.05 ICS : 0.07 IQSR : -0.04
```


SiC	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.96%
		IQC	:	0.11	ICS	:	-0.11					
Fe2O3	o	In	:	11.95	Out	:	0.00	Error	:	0.18	Error/(In+Gen.):	1.53%
		ICHO	:	-11.77	IHHO	:	0.00					
Fe3O4	o	In	:	0.38	Out	:	0.00	Error	:	-0.18	Error/(In+Gen.):	-1.52%
		ICHO	:	11.38	ICMO	:	-10.72	IHHO	:	0.00	IHMO	: -1.22
Fe	o	In	:	1.87	Out	:	0.00	Error	:	0.11	Error/(In+Gen.):	0.83%
		ICMO	:	10.10	ICWO	:	-8.28	IHMO	:	1.14	IHW	: -4.04
		ICWO	:	6.36	IHW	:	3.11	IMIO	:	-9.48	IMWO	: -0.68
Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.10%
		ICWO	:	6.36	IHW	:	3.11	IMIO	:	-9.48		
H2O	o	In	:	0.87	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.07%
		IEVO	:	-0.87								
slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00								
SiO2	o	In	:	1.86	Out	:	0.00	Error	:	0.02	Error/(In+Gen.):	0.86%
		IMSO	:	-1.85								
H2O	c	In	:	0.44	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.05%
		IEVC	:	-0.44								
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC	:	0.00								
SiO2	c	In	:	0.06	Out	:	0.00	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-2.16%
		IMSC	:	-0.13	IQC	:	-0.17	IQM	:	0.23		
Al2O3	o	In	:	0.06	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.09%
		IMAO	:	-0.06								
MgO	o	In	:	0.51	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.26%
		IMMO	:	-0.51								
CaO	o	In	:	2.26	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.12%
		IMCO	:	-2.26								
Al2O3	c	In	:	0.71	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.21%
		IMAC	:	-0.71								
MgO	c	In	:	0.02	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.12%
		IMMC	:	-0.02								
CaO	c	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.02%
		IMCC	:	-0.05								
Fe	l	In	:	0.00	Out	:	10.11	Error	:	-0.09	Error/(In+Gen.):	-0.92%
		IMIO	:	9.48	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.54		
C	l	In	:	0.00	Out	:	0.65	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-1.46%
		ICD	:	0.66	ISI	:	-0.02					
Si	l	In	:	0.00	Out	:	0.06	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-4.40%
		ISI	:	0.05								
C	f	In	:	0.61	Out	:	0.29	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.43%
		IO1F	:	-0.32	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWF	: 0.00
Volats		In	:	0.15	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.66%
		ICV	:	-0.12	IVS	:	-0.04					
Ash	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error	:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
		IMGF	:	0.00								
SiO2	f	In	:	0.04	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.17%
		IMSF	:	-0.04								
Al2O3	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.17%
		IMAF	:	-0.03								
MgO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.17%
		IMMF	:	0.00								
CaO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.17%
		IMCF	:	0.00								
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00					
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHM	: 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHM	:	0.00	IHW	: 0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICWX	:	0.00	IHW	:	0.00	IMIX	:	0.00		
slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FeO	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-3.47%
		IMWO	:	0.68	IMWX	:	0.00	IDR	:	-0.71		
slag	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00		
SiO2	l	In	:	0.00	Out	:	1.84	Error	:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.26%
		IMSO	:	1.85	IMSC	:	0.13	IMSF	:	0.04	IQSR	: -0.18

Al2O3l	In	:	0.00	Out	:	0.81	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-1.44%	
	IMAO	:	0.06	IMAC	:	0.71	IMAF	:	0.03			
Mgo	l	In	:	0.00	Out	:	0.54	Error	:	-0.01	Error/(In+Gen.):	
	IMMO	:	0.51	IMMC	:	0.02	IMMF	:	0.00			
CaO	l	In	:	0.00	Out	:	2.33	Error	:	-0.02	Error/(In+Gen.):	
	IMCO	:	2.26	IMCC	:	0.05	IMCF	:	0.00			
Fe2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%	
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00		:				
Fe3O4x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%	
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx	:	
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICMX	:	0.00	ICWx	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx	:	
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICWx	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00			
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%	
Mgo	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error	:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%

Stream Analyses		Mass Rate	Mass Frac.	Mole Rate	Mole Frac.	Rate
		(kg/s)	(%)	(kmol/s)	(%)	(kg/thm)
Ore	(in)	19.778	100.000	0.237	100.000	1828.115
Fe2O3o		11.954	60.440	0.075	31.617	1104.913
Fe3O4o		0.378	1.910	0.002	0.689	34.917
FexO o		1.875	9.480	0.027	11.468	173.305
H2O o		0.874	4.420	0.049	20.496	80.803
SiO2 o		1.863	9.420	0.031	13.097	172.208
Al2O3o		0.065	0.327	0.001	0.268	5.973
Mgo o		0.510	2.581	0.013	5.349	47.181
CaO o		2.259	11.422	0.040	17.016	208.815

Coke	(in)	5.663	100.000	0.399	100.000	523.455
C c		4.386	77.450	0.365	91.559	405.416
H2O c		0.439	7.750	0.024	6.108	40.568
SiO2 c		0.059	1.050	0.001	0.248	5.496
Al2O3c		0.710	12.533	0.007	1.745	65.602
Mgo c		0.018	0.322	0.000	0.114	1.687
CaO c		0.051	0.895	0.001	0.227	4.686

All solid	(in)	25.442	100.000	0.636	100.000	2351.571
C c		4.386	17.240	0.365	57.457	405.416
Fe2O3o		11.954	46.986	0.075	11.776	1104.913
Fe3O4o		0.378	1.485	0.002	0.257	34.917
FexO o		1.875	7.370	0.027	4.272	173.305
H2O o		0.874	3.436	0.049	7.634	80.803
SiO2 o		1.863	7.323	0.031	4.878	172.208
H2O c		0.439	1.725	0.024	3.833	40.568
SiO2 c		0.059	0.234	0.001	0.156	5.496
Al2O3o		0.065	0.254	0.001	0.100	5.973
Mgo o		0.510	2.006	0.013	1.992	47.181
CaO o		2.259	8.880	0.040	6.338	208.815
Al2O3c		0.710	2.790	0.007	1.095	65.602
Mgo c		0.018	0.072	0.000	0.071	1.687
CaO c		0.051	0.199	0.001	0.142	4.686
Scrap		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Blast	(in)	19.252	100.000	0.668	100.000	1384.572
H2O g		0.012	0.061	0.001	0.097	1.345
O2 g		4.274	22.203	0.134	19.986	276.726
N2 g		14.966	77.737	0.534	79.916	1106.500

Fines	(in)	0.879	100.000	0.097	100.000	81.241
C f		0.611	69.519	0.051	52.599	56.479
Volats		0.154	17.476	0.044	45.691	14.198
Ash f		0.035	3.979	0.001	0.561	3.232
SiO2 f		0.044	5.047	0.001	0.763	4.100
Al2O3f		0.032	3.633	0.000	0.324	2.951
Mgo f		0.001	0.092	0.000	0.021	0.074
CaO f		0.002	0.254	0.000	0.041	0.207

Top Gas	(out)	28.283	100.000	0.947	100.000	1962.675
CO g		4.792	16.942	0.171	18.057	354.398
CO2 g		7.738	27.358	0.176	18.558	364.235

H2	g	0.020	0.071	0.010	1.050	20.611
H2O	g	1.467	5.189	0.081	8.598	168.749
O2	g	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
N2	g	14.262	50.427	0.509	53.727	1054.493
SiO	g	0.004	0.014	0.000	0.010	0.188
----- (kg/thm) -----						
Fines (out)		0.296	100.000	0.024	100.000	27.325
C	f	0.289	97.741	0.024	99.613	26.707
SiO2	f	0.004	1.263	0.000	0.257	0.345
Al2O3f		0.003	0.909	0.000	0.109	0.248
MgO	f	0.000	0.023	0.000	0.007	0.006
CaO	f	0.000	0.064	0.000	0.014	0.017
----- (kg/thm) -----						
Hot Metal (out)		10.819	100.000	0.237	100.000	1000.000
Fe	l	10.113	93.473	0.181	76.330	934.727
C	l	0.651	6.014	0.054	22.836	60.136
Si	l	0.056	0.514	0.002	0.834	5.138
----- (kg/thm) -----						
Hot Slag (out)		5.519	100.000	0.093	100.000	510.125
FexO	l	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003
SiO2	l	1.835	33.253	0.031	32.685	169.630
Al2O3l		0.814	14.743	0.008	8.541	75.210
MgO	l	0.536	9.713	0.013	14.231	49.546
CaO	l	2.334	42.291	0.042	44.542	215.736

Liquid Mass Rates

	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	10.819	934.8	3.3171
Slag	5.519	476.8	1.6921
Total	16.338	1411.6	5.0092

Global Elemental Balance (kg/s)

Component	Inflow				Outflow			
	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	10.075	0.000	10.075	0.000	10.113	0.000	10.113
C	0.000	4.386	0.684	5.071	4.166	0.651	0.289	5.106
O	4.285	7.555	0.071	11.911	9.668	2.239	0.003	11.910
H	0.001	0.147	0.035	0.184	0.184	0.000	0.000	0.184
N	14.966	0.000	0.014	14.979	14.262	0.000	0.000	14.262
Si	0.000	0.899	0.021	0.919	0.003	0.913	0.002	0.918
Al	0.000	0.410	0.017	0.427	0.000	0.431	0.001	0.432
Ca	0.000	1.651	0.002	1.652	0.000	1.668	0.000	1.668
Mg	0.000	0.319	0.000	0.319	0.000	0.323	0.000	0.323
Total	19.252	25.442	0.879	45.572	28.283	16.338	0.296	44.917

Global Enthalpy Balance (MW)

Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	22.98	-0.16	22.83	3.86	-107.80	-103.94
Solid	0.00	-160.01	-160.01	-1.21		-1.21
Liquid				13.28	3.08	16.36
Slag				12.09	-57.11	-45.02
Fines	1.42	-6.54	-5.12	0.06	-0.35	-0.29
Solid to wall				-0.12		-0.12
Gas to wall				-0.12		-0.12
Sum totals	24.41	-166.71	-142.30	27.85	-162.18	-134.33
Error (In-Out)	-7.97					

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi laju alir udara pada penelitian ini berpengaruh terhadap profil temperatur pada MBF. Semakin tinggi laju alir udara yang digunakan maka profil temperatur akan naik. Profil temperatur tertinggi didapatkan pada variasi blast 19,25 Kg/s dan yang paling rendah pada variasi blast 10,36 Kg/s. Kenaikan profil temperatur ini akan menaikkan *burden velocity* dan produktifitas MBF, dimana produktifitas tertinggi diperoleh dari variasi blast 19,25 kg/s dengan nilai 934,8 t/day.
2. Variasi laju alir udara mempengaruhi profil tekanan pada MBF. Semakin tinggi laju alir udara yang digunakan maka profil tekanan akan naik. Profil tekanan tertinggi didapatkan pada variasi laju alir 19,25 Kg/s dan yang paling rendah pada variasi laju alir 10,36 Kg/s. Akan tetapi, *pressure drop* juga akan naik seiring dengan kenaikan blast, dimana *pressure drop* tertinggi diperoleh dari variasi laju alir 19,25 kg/s dengan nilai 0,94 atm
3. Variasi laju alir udara pada penelitian ini tidak akan mempengaruhi fraksi volume gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida pada MBF. Akan tetapi jumlah gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida akan terus meningkat seiring dengan peningkatan laju alir udara. Nilai tertinggi diperoleh dari nilai laju alir udara 19,25 kg/s. Akan tetapi, dengan peningkatan laju alir udara akan mengurangi efisiensi MBF dimana efisiensi MBF tertinggi diperoleh dari variasi laju alir udara 10,36 kg/s.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya mengenai pemodelan laju alir udara maupun pemodelan *blast furnace* dengan variabel yang lain beberapa saran antara lain.

1. Melakukan pemodelan dengan *working volume* yang lebih kecil lagi.
2. Melanjutkan ke pemodelan 3D atau 2D secara transien
3. Melakukan pemodelan dengan menggunakan bentuk geometri yang berbeda

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Pardiarto, 2011. "Peluang Bijih Besi Dalam Pemenuhan Kebutuhan Komoditas Mineral Strategis". Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Babich, A. and Aachen Institut für Eisenhüttenkunde, 2008." *Ironmaking: textbook*". RWTH.
- Biswas, A.K., 1982." *Principles of blast furnace iron making*", Cootha Publ. House, Brisbane, 189.
- Castro, Jose Adilson Ed. 2000." *A Multi-Dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Base on Multi-Fluid Model*". Tohoku University, Jepang.
- Chaterjee, Amit. 2001. Metallic for steelmaking production and use. Allied Publisher. New Delhi
- Gaskell,R.D. 1981. Introduction to thermodynamics of materials, 2nd Edition, Mc Graw Hill, New York
- Geerdes, M., Toxopeus, H., & van der Vliet, C. 2009." *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*". IOS Press.
- Gerstenberg, B. 1964. Stahl u Eisen. p 1105-1120
- H. Nogami, Mansheng Chu, J. Yagi, 2006. "*Numerical analysis on blast furnace performance with novel feed material by multi-dimensional simulator based*". mathematical modelling 30, Jepang.
- Heynert, G and J Willems. 1959. Stahl u Eisen. p 1545-1554
- Ishiwata, N., Iwai, Y., Murai, R., Sawa, Y. and Sato, M., 2011." *Effect of coke diameter and oxygen concentration of blast on cupola operation*". ISIJ international, 51(8), pp.1353-1359.
- J. Yagi, H. Nogami, Aibing Yu, 2006. "*Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency*

operations". international conference on CFD in the process industries, Australia.

J Yagi, Hiroshi Nogami, Mansheng CHU, 2003. "*Numerical Analysis on Blast Furnace Performance Dimensional Transient Simulator Based on Multy-Fluid Theory*". international conference on CFD in the process industries, Australia.

Kitaev, B.I., Yaroshenko, Y.G. and Suchkov, V.D., 1957. "*Heat Transfer in Shaft Furnaces*". Metallurgizdat, Sverdlovsk.

Kmieć, A., 1976. "*Some remarks on the Richardson-Zaki equation*". The Chemical Engineering Journal, 11(3), pp.237-238.

Rahmat, A. (2016). *Studi Desain Blast Furnace Kapasitas 5000 Ton/Hari Dengan Sumber Reduktan Arang Berbasis Pemodelan*. Surabaya: ITS.

S Natsui, Sigeru Ueda, Hiroshi Nogami, J Kano, Ryou Inoue, 2011. "*Analysis on Non-Uniform Gas Flow in Blast Furnace Base on DEM-CFD Combine Model*". *Steel Research Int* 82 No.8.

Sungging Pintowantoro, 2005. "*Fundamental Study of Powder Deposition in Blast Furnace Base on Multi-Fluid Theory*". Tohoku University, Jepang.

Pandey, B., 2001. "*Metallurgy for Steelmaking: Production and Use*". Allied Publishers.

Patterson, W., Siepmann, H., Pacyna, H., (1961), "Giesserei Tech", Wiss. Beihette, Vol 13, Oct., pp 239-252.

Teuku Ishlah, 2011. "Potensi Bijih Besi Indonesia Dalam Kerangka Pengembangan Klaster Industri Baja". Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.

Thibaut. CH. 1958. *Cir inform techs*. p 1863-1877

- Upadhyaya, S.G., Dube, K.R., .1977. “*Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics, 1st edition*”. Pergamon Press, Oxford.
- Wyllie, M.R.J. and Gardner, G.H.F., 1958. “*The generalized Kozeny-Carman equation*”. World Oil, 146(4), pp.121-128.
- Wonnacott, T.H. and Wonnacott, R.J., 1972.” *Introductory statistics (Vol. 19690)*”. New York: Wiley.
- Yansong Shen, Aibing Yu, P Austin, 2009.“*Paul Zulli, In-Furnace Modelling of Pulverized Coal Injection in an Ironmaking Blast Furnace: Effect of Key Variables On Gas Distribution*”, Australia.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis Bernama lengkap **Afriyanto** , Pria kelahiran Temanggung, 11 April 1994, merupakan anak pertama dari pasangan Priswanto dan Mardiya. Memulain Pendidikan formal di SDN Jamusan, Pendidikan Dilanjutkan di SMP Negeri 01 Ngadirejo, SMA Negeri 1 Temanggung, Kemudian Melanjutkan studi S1 jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri- ITS Surabaya melalui jalur SNMPTN Tulis dan terdaftar dengan NRP 2712100061.

Penulis Aktif dalam berbagai kegiatan organisasi mahasiswa kampus, diantaranya yaitu Staff Ahli Divisi Event BSO-MTC HMMT FTI- ITS periode 2014/2015. Penulis Juga aktif dalam mengikuti kompetisi nasional. Salah satu lomba tingkat Nasioal yaitu PIMNAS 28 di Universitas Halu Oleo Kendari Sulawesi Tenggara.

Untuk memulai fokus keprofesian, Mahasiswa melakukan kerja perktek di PT Petrokimia Gresik dan mengambil tugas akhir Laboratorium pengolah Mineral dan Material dengan judul “ Analisa Numerik Pengaruh Laju Alir Udara Terhadap Distribusi Temperatur dan Tekanan Pada *Mini Blast Furnace*”

Email : afri_afriyanto@ymail.com